

Jorge António de Carvalho Sousa Valadares

**CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS
NO
ENSINO DA FÍSICA
À LUZ DA
FILOSOFIA DA CIÊNCIA**

*Dissertação de Doutoramento em Ciências da Educação
- especialidade: Didáctica da Física*

VOLUME I

UNIVERSIDADE ABERTA

LISBOA

1995

Jorge António de Carvalho Sousa Valadares

**CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS
NO
ENSINO DA FÍSICA
À LUZ DA
FILOSOFIA DA CIÊNCIA**

Volume I

Dissertação de Doutoramento em Ciências da Educação

- especialidade: Didáctica da Física

Sob a orientação do Professor Catedrático

Doutor Armando Rocha Trindade

UNIVERSIDADE ABERTA

LISBOA

1995

Agradecimentos

Estou imensamente grato ao meu orientador, Professor Doutor Rocha Trindade, por todo o estímulo que me deu ao longo dos anos que durou este trabalho, bem como pelas muitas horas que dispendeu comigo em frutuosas discussões acerca do mesmo. Também quero agradecer ao Professor Joseph Novak o saber e a coragem que me proporcionou.

Finalmente, estou também em dívida de gratidão para com o meu amigo e co-autor de livros de Física, Dr. Luís Silva, pela revisão linguística do primeiro volume deste trabalho, e para com os amáveis Colegas Dr. António Romão e Dr. Francisco Soalheira, professores de Filosofia do Colégio Militar, pelas animadas conversas sobre Epistemologia que aceitaram ter comigo.

ÍNDICE GERAL

VOLUME I

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

<i>1.1. Contexto e motivação</i>	<i>13</i>
<i>1.2. Concretização do problema a investigar.....</i>	<i>16</i>
<i>1.3. Fundamentação da escolha do problema.....</i>	<i>18</i>
<i>1.4. Valor teórico desta investigação.....</i>	<i>24</i>
<i>1.5. Valor prático desta investigação.....</i>	<i>26</i>
<i>1.6. Fases da investigação</i>	<i>28</i>
<i>1.7. Algumas considerações de natureza ética.....</i>	<i>32</i>

CAPÍTULO II - PROBLEMATIZAÇÃO E METODOLOGIA

<i>2.1. O «vê» epistemológico.....</i>	<i>35</i>
<i>2.2. A questão central.....</i>	<i>36</i>
<i>2.3. Os acontecimentos/objectos.....</i>	<i>38</i>
<i>2.4. Os conceitos utilizados.....</i>	<i>40</i>
<i>2.5. Os princípios adoptados.....</i>	<i>42</i>
<i>2.6. A transformação de factos em dados e os juízos acerca dos mesmos.....</i>	<i>44</i>
<i>2.7. As teorias subjacentes e a mudança conceptual ocorrida acerca das mesmas....</i>	<i>45</i>
<i>2.8. Um lampejo da posição filosófica subjacente a este trabalho.....</i>	<i>46</i>

CAPÍTULO III- UMA REFLEXÃO EM TORNO DA FILOSOFIA DA CIÊNCIA

3.1	<i>Introdução.....</i>	51
3.2.	<i>Demarcação dos problemas a discutir.....</i>	54
3.3.	<i>O problema da possibilidade do conhecimento pleno da realidade exterior..</i>	57
3.3.1	Do dogmatismo dos primitivos gregos ao cepticismo nominalista.....	57
3.3.2	A autonomia da razão.....	61
3.3.3	Que conhecemos: a realidade ou simples ideias?.....	62
3.3.4	O criticismo kantiano.....	66
3.3.5	A Física do século XIX e o conhecimento positivo.....	67
3.3.6	As grandes críticas de Mach e Poincaré à Física newtoniana.....	69
3.3.7	A Física do século XX e o movimento analítico.....	71
3.3.8	O operacionalismo, o construtivismo e a visão actual da Ciência.....	75
3.4.	<i>A ciência física não pode ter como objectivo o conhecimento pleno da realidade exterior - 1ºPrincípio.....</i>	77
3.4.1	Nem cepticismo nem dogmatismo acerca do conhecimento do mundo físico.....	77
3.4.2	O criticismo moderno como resposta ao problema do conhecimento da realidade exterior	79
3.4.3	Alguns aspectos importantes do criticismo	82
3.5.	<i>O problema da origem do conhecimento físico.....</i>	86
3.5.1	Empirismo <i>versus</i> racionalismo	86
3.5.2	Breve história do racionalismo	87
3.5.3	Breve história do empirismo	95
3.5.4	Posições superadoras entre o empirismo e racionalismo	100
3.6.	<i>Há uma dialéctica entre a razão e a experiência no estabelecimento da ciência física - 2ºPrincípio.....</i>	112

3.7.	<i>O problema da essência do conhecimento</i>	123
3.7.1	O realismo	124
3.7.2	O idealismo	130
3.7.3	Posições históricas que procuraram uma superação entre idealismo e realismo	133
3.8.	<i>A Física é uma construção humana e dialéctica resultante da interacção entre o sujeito e o objecto, entre o pensamento e a acção - 3º Princípio</i>	153
3.9.	<i>O conhecimento físico de cada ser humano é uma construção pessoal e idiossincrásica - 4º Princípio</i>	159
3.10.	<i>O problema das formas, das motivações e da metodologia da Física</i>	168
3.10.1	A influência dos factores sociais na Ciência	170
3.10.2	A influência das concepções metafísicas	171
3.10.3	A dialéctica do conhecimento do mundo	172
3.10.4	A intuição, a dedução e a indução no conhecimento científico	174
3.10.5	Existência de concepções antitéticas acerca do mundo	177
3.10.6	São necessárias infra-estruturas para fazer funcionar os instrumentos do conhecimento	179
3.10.7	Características dos modelos científicos que prevalecem e os obstáculos epistemológicos que se levantam à mudança conceptual	183
3.10.8	As contradições teóricas dos modelos estão na base da mudança conceptual	186
3.10.9	As idiossincrasias dos cientistas e a dinâmica do erro na construção da Ciência	189
3.10.10	As grandes antíteses metodológicas na reflexão histórica sobre a Ciência	193
3.10.11	A superação metodológica na «Filosofia Natural» de Galileu e Newton	196
3.10.12	A Ciência procura a generalização conceptual a caminho de um modelo de estrutura racional do mundo	205

3.10.13	A Física é uma só, uma ciência teórico-experimental.....	208
3.10.14	Há dois níveis de pensamento que se revelaram fundamentais na história da Ciência.....	213
3.11.	<i>O pensamento vulgar antecede o pensamento científico e constitui um obstáculo à construção deste - 5º Princípio.....</i>	222
3.12	<i>Há um isomorfismo entre a construção do conhecimento físico por cada indivíduo e a construção do conhecimento físico ao longo da história - 6º Princípio.....</i>	224
3.13	<i>Não há um método científico, mas, sim, uma atitude científica. Hipóteses, modelos e experimentação interagem não linearmente - 7º Princípio.....</i>	230
3.14	<i>Na comunidade dos físicos e dos professores de Física assentaram ideias demasiado realistas e empiristas.....</i>	239
3.15.	<i>O problema da validade e da demarcação do conhecimento físico</i>	246
3.15.1	Diversos conceitos de verdade e modos de a ela aceder.....	246
3.15.2	A demarcação entre Filosofia e Teologia.....	249
3.15.3	O surgimento de critérios de demarcação da Ciência.....	250
3.15.4	A validade do conhecimento nos séculos XVIII e XIX.....	253
3.15.5	A validade e a demarcação da Ciência no século XX.....	255
3.16.	<i>As teorias físicas têm um valor normativo e não um valor axiológico - 8º Princípio.....</i>	259
3.17.	<i>A demarcação entre Ciência e não-Ciência nem sempre é nítida - 9º Princípio.....</i>	262

VOLUME II

CAPÍTULO IV - CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS NO ENSINO DA FÍSICA

<i>4.1. Introdução e problematização.....</i>	<i>285</i>
<i>4.2. Concepções alternativas nos alunos de Física.....</i>	<i>290</i>
4.2.1 Concepções alternativas acerca da grandeza força.....	291
4.2.2 Concepções alternativas acerca dos movimentos.....	305
4.2.3 Concepções alternativas acerca da inércia e da massa dos corpos.....	318
4.2.4 Concepções alternativas acerca da energia.....	326
4.2.5 Concepções alternativas sobre o calor e a temperatura.....	329
4.2.6 Concepções alternativas sobre a constituição corpuscular da matéria.....	331
<i>4.3. Características das concepções alternativas dos alunos.....</i>	<i>333</i>
4.3.1 A persistência das concepções alternativas.....	333
4.3.2 A homogeneidade e universalidade das concepções alternativas.....	335
4.3.3 A analogia entre concepções alternativas dos alunos e concepções históricas.....	336
4.3.4 As concepções alternativas surgem muitas vezes escondidas pela linguagem técnica.....	345
<i>4.4. Origens das concepções alternativas dos alunos.....</i>	<i>346</i>
<i>4.5. Conclusões a respeito das concepções alternativas dos alunos.....</i>	<i>368</i>
<i>4.6. Concepções alternativas dos professores de Física.....</i>	<i>371</i>
4.6.1 Concepções alternativas envolvendo o conceito de força.....	372
4.6.2 Concepções alternativas envolvendo o conceito de peso.....	381
4.6.3 Concepções alternativas acerca das leis de Newton do movimento...	392
4.6.4 Concepções alternativas acerca da energia e da relação entre o trabalho das forças e a variação da energia dos corpos.....	400
4.6.5 Concepções alternativas acerca do calor e da temperatura.....	414

4.6.6	Concepções alternativas acerca da massa.....	417
4.6.7	Concepções alternativas reveladas por professores de níveis elementares de ensino.....	424
4.6.8	Mais algumas ideias confusas e/ou incorrectas detectadas no ensino da Física em Portugal.....	426
4.7.	<i>Características das concepções alternativas dos professores.....</i>	433
4.7.1	A analogia entre as concepções alternativas dos professores e as concepções históricas.....	433
4.7.2	A persistência das concepções alternativas nos professores.....	439
4.7.3	A homogeneidade e universalidade das concepções alternativas dos professores.....	442
4.7.4	As concepções alternativas dos professores surgem muitas vezes escondidas por trás da linguagem técnica.....	445
4.7.5	Nas concepções alternativas dos professores existe uma falta de consistência interna e externa.....	448
4.8.	<i>Origens das concepções alternativas dos professores.....</i>	455
4.9.	<i>Conclusões a respeito das concepções alternativas dos professores.....</i>	483
4.10.	<i>Concepções alternativas em Física.....</i>	485
4.10.1	Concepções alternativas na história da Ciência acerca do conceito de massa.....	497
4.11.	<i>Características gerais das concepções alternativas em Física.....</i>	508
4.11.1	As concepções alternativas desempenharam um papel importante no desenvolvimento da Ciência	508
4.11.2	Muitas das concepções alternativas que surgiram na história da Física são iguais às que professores e alunos têm manifestado	509
4.11.3	Muitas das concepções alternativas que surgiram na história da Física revelaram uma enorme persistência	511
4.11.4	As concepções alternativas em Física têm um carácter generalizado e homogéneo	512
4.11.5	As concepções alternativas em Física têm subjacentes determinadas convicções geralmente de índole filosófica	514
4.11.6	As concepções alternativas em Física enquadram-se numa determinada estrutura conceptual	515

<i>4.12. Origens das concepções alternativas nas ciências físicas</i>	<i>522</i>
4.12.1 Na raiz das concepções alternativas está a natureza da Ciência	522
4.12.2 Alguns factores responsáveis pelas concepções alternativas na Física.....	528
<i>4.13. Conclusões acerca das concepções alternativas em Física.....</i>	<i>542</i>

CAPÍTULO V - JUÍZOS DE ÍNDOLE COGNITIVA E DE VALOR EDUCACIONAL. IMPLICAÇÕES NA EDUCAÇÃO CIENTÍFICA DOS ALUNOS DE FÍSICA

<i>5.1.</i>	
<i>Introdução.....</i>	<i>547</i>
<i>5.2. Resumo de algumas conclusões extraídas deste trabalho.....</i>	<i>548</i>
<i>5.3. Conclusões retiradas das respostas à escala de graduação («rating scale») administrada a professores.....</i>	<i>555</i>
<i>5.4. Juízos de índole cognitiva.....</i>	<i>559</i>
<i>5.5. Juízos de valor educacional.....</i>	<i>564</i>
<i>5.6. Implicações na educação científica dos alunos de Física.....</i>	<i>566</i>
5.6.1 O <i>curriculum</i>	566
5.6.2 O professor de Física	578
5.6.3 A avaliação educativa.....	587
5.6.4 A governança.....	590

NOTAS.....	593

CAPÍTULO I.....	595
CAPÍTULO II.....	601
CAPÍTULO III.....	605
CAPÍTULO IV.....	673
CAPÍTULO V.....	685

GLOSSÁRIO.....	689

BIBLIOGRAFIA GERAL.....	699

APÊNDICES.....	745

APÊNDICE I - PENSAMENTO ESPONTÂNEO DE PROFESSORES DO
ENSINO SECUNDÁRIO ACERCA DA RELATIVIDADE DE GRANDEZAS
MECÂNICAS

APÊNDICE II - CONCEPÇÕES EPISTEMOLÓGICAS DOS PROFESSORES
SOBRE O CONHECIMENTO FÍSICO

APÊNDICE III - O CONCEITO DE MASSA - INTRODUÇÃO HISTÓRICA

APÊNDICE IV - O CONCEITO DE MASSA - ANÁLISE DO CONCEITO

APÊNDICE V - A ENERGIA

APÊNDICE VI - ALGUNS ASPECTOS ESSENCIAIS SOBRE A ENERGIA

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

***"Somos prisioneiros enclausurados no referencial das
nossas teorias"***

Popper

1.1. Contexto e motivação

O conhecimento de um ser humano é um *processo* (1) contínuo através do qual ele vai construindo as suas *representações*^{*1} acerca do mundo que o cerca a partir das percepções sensoriais e guiado pelas ideias que vai possuindo no seu intelecto. A *Física*, como qualquer ciência, é um *mundo de representações, pessoal e socialmente construídas* (2). Este aparente paradoxo explica-se pelo facto de, ao mesmo tempo, cada ser humano ir modificando, idiossincrasicamente, as suas próprias ideias e, através da «*negociação*» dessas ideias individuais, irem surgindo *representações sociais* que acabam por constituir o quadro conceptual da Física. Às representações que, em cada momento, prevalecem na comunidade dos físicos, que permitem o diálogo entre eles e a investigação científica, chamamos *concepções físicas*. O seu estatuto epistemológico será discutido no capítulo 3. Por ora adiantaremos que essas concepções são um dos melhores produtos da mente humana e que o processo da sua construção é excepcionalmente influenciado por alguns homens, mas nem por isso deixa de ser um processo eminentemente social (3).

¹O significado atribuído às palavras acompanhadas do sinal * encontra-se num glossário em apêndice a este trabalho.

As concepções físicas, como produto do ser humano, não têm que ser encaradas como infalíveis e indiscutíveis. Nem tão pouco são compartilhadas por todos os elementos do universo dos físicos. Elas englobam os *conceitos**, os *princípios** e as *teorias** que servem aos especialistas em cada campo da Física para fazer progredir o conhecimento nesse campo. O seu objectivo é fundamentar, com base num quadro explicativo uniforme, o modo como ocorrem os fenómenos, estabelecer relações entre eles, e fazer previsões a respeito de futuros fenómenos.

Caso as concepções físicas se revelem incapazes de fazer progredir o conhecimento, porque em contradição com os resultados da "*madre de todas as cousas*", a experiência (4), então perdem o estatuto de funcionalidade que lhes assiste e são abandonadas.

O ensino da Física é uma «negociação» de significados que exige arte, ciência e muito trabalho. A sua principal finalidade é facilitar a *aprendizagem de cada aluno*, isto é, a construção por cada aluno de representações acerca do mundo físico que se identifiquem o mais possível com as concepções físicas. A *Didáctica da Física* tem por objectivo contribuir para a melhoria do ensino dessa ciência. O cumprimento dessa missão não é fácil porque, de facto, se a natureza e o processo da ciência ainda continua a ser (e porventura será sempre) objecto de debate, o mesmo sucede, e em muito maior grau, com o seu ensino (Baird, 1988, p. 55). Consequentemente, muitas dúvidas persistem acerca da melhor forma de ensinar a Física, mas tal facto não deve esmorecer os professores e investigadores em Didáctica da Física a prosseguir com o seu trabalho, na tentativa de melhorar o ensino dessa importante ciência.

A presente investigação situa-se precisamente na área da *Didáctica da Física*. O quadro conceptual desta, a exemplo do que sucede com todas as outras didácticas específicas, integra-se no contexto muito geral das Ciências da Educação. Trata-se de uma área do conhecimento que, pela sua natureza, depende de muitas outras, a começar, e sem dúvida com a sua máxima relevância, pela própria Física.

Para se ensinar eficazmente Física é necessário, em primeiro lugar, dominar-se, e bem, as concepções físicas a ensinar. Mas não basta. É necessário também dispor do domínio dos métodos e das técnicas de ensino de uma ciência, o que passa pelo investimento do professor nos campos científicos mais variados que têm que ver com as condições em que decorre o acto educativo. Este é, de facto, o momento crucial em que os alunos irão tirar partido do talento do professor, o qual, sem dúvida, é influenciado pelos conhecimentos adquiridos em vários campos e pela experiência acumulada.

A melhoria do ensino da Física por parte de um professor exige, portanto, um maior domínio das representações sociais dos físicos, mas passa também por um maior conhecimento de resultados de pura reflexão e investigação incidentes na prática educativa. Esses resultados, quando transpostos para as situações de aprendizagem, rentabilizam os recursos de que o professor dispõe para facilitar aos seus alunos o acesso às concepções físicas (5).

Se o domínio em profundidade das concepções físicas pressupõe uma reflexão sobre a *história* da sua evolução e sobre a natureza do conhecimento que a elas conduziu (*epistemologia*), o domínio dos métodos e técnicas de melhoria do acto educativo exige ainda que o professor se aventure em vastas áreas do conhecimento como as da *Psicologia Educacional*, da *Sociologia da Educação*, da *Avaliação Educativa*, etc, etc. Estas áreas interpenetram-se, pelo que o professor será tão mais eficiente quanto mais puder vir a dispor de uma síntese dos conhecimentos de todas elas.

Este trabalho, que submetemos ao exame crítico de quem tiver como missão ajuizar sobre ele, é, antes do mais, um produto de quase trinta anos de ensino e de reflexão sobre o ensino. Duas foram as grandes *finalidades* que nos propusemos alcançar. Uma delas foi atingida: tivemos o privilégio de *acrescentar à nossa experiência todo um património intelectual acumulado ao longo deste trabalho*.

A outra finalidade, a mais importante, é a de este trabalho poder *contribuir para a valorização didáctica dos professores que o vierem a analisar*. Se esta finalidade foi ou não alcançada, não cabe a nós pronunciarmo-nos.

1.2. Concretização do problema a investigar

A *investigação* que levámos a cabo é complexa, envolvendo duas componentes paralelas, uma *física*, onde surgem conceitos, princípios e teorias da Física e outra *educativa*, onde aparecem conceitos, princípios e teorias das ciências da educação. O trabalho centrou-se, fundamentalmente, numa **questão central**, **questão foco** ou **questão expressiva** (*telling question*), a qual esteve sempre no pensamento quer ao longo da demorada planificação quer, depois, durante a execução. Essa questão central é a seguinte:

Como é que as representações que os professores de Física do nosso país «negoceiam» com os alunos se relacionam com a ciência física e a reflexão que sobre essa ciência é feita na Epistemologia?

Por razões de operacionalidade, centrámos a investigação no domínio da Mecânica, mas não no domínio restrito da chamada Mecânica Clássica, tentando reunir dados que também têm a ver com a Teoria da Relatividade Restrita e até com a Termodinâmica.

A metodologia, que será concretizada no próximo capítulo, assenta em duas vertentes interdependentes (Gowin, 1990, pp. 23-34 ; Novak e Gowin, 1991, pp. 149-174):

- uma *vertente reflexiva* sobre a Física e o seu ensino, que traduzirá as concepções resultantes da interacção entre a nossa experiência nesse campo (como professor, orientador de cursos de formação de professores, investigador em Didáctica e autor de livros didácticos) e a pesquisa bibliográfica que efectuámos de variados trabalhos sobre *Física, História da Física, Epistemologia da Física, Didáctica da Física, Psicologia da Educação e Sociologia da Educação*;
- uma *vertente metodológica*, que consiste essencialmente na recolha e análise de dados acerca de concepções físicas ortodoxas e não ortodoxas ao longo da história da ciência, de representações de alunos e professores de Física do ensino pré-universitário, de ideias existentes em manuais que eles usaram e usam, bem como de possíveis concepções epistemológicas subjacentes a todas elas.

A primeira componente referida *fornece o enquadramento teórico para a investigação efectuada*. Esse enquadramento teórico diz respeito não só a *conceitos físicos e educativos*, como também a *algumas teorias e princípios, englobando a própria metodologia do trabalho*. A adopção destes princípios, teorias e conceitos já envolveu uma longa pesquisa e uma reflexão profunda, tendo conduzido a escolhas conscientes que também submetemos à crítica nos capítulos 3 e 4. Pedimos desde já desculpa por essa componente reflexiva ter um enorme peso no que respeita à Filosofia da ciência, a que dedicamos um extenso capítulo. Tal facto deve-se à necessidade intelectual de nos alicerçarmos em bases filosoficamente sólidas e transparentes, o que de modo algum significa indiscutíveis.

A segunda componente foi conduzida de modo a fundamentar determinadas afirmações que iremos produzir no capítulo 5 como resposta ao problema formulado e que têm que ver, fundamental mas não exclusivamente, com *representações* mais ou menos empíricas, mais ou menos estruturadas, mais ou menos apreendidas significativamente, *que proliferam no ensino da Física do nosso país*, e que não se identificam com as concepções físicas. Elas irão ser designadas globalmente por *concepções alternativas**, por razões que explicaremos no capítulo 4.

Dada a natureza desta investigação, e por simplicidade de leitura, resolveu-se, portanto, englobar na designação geral *concepções alternativas* o que na literatura em língua inglesa das ciências de educação é designado por *alternative conceptions*, *misconceptions*, *spontaneous conceptions*, *preconceptions* ou *alternative frameworks*. Estas designações não têm todas exactamente o mesmo significado, e o significado de cada uma delas varia algo de autor para autor. Porém, as analogias entre os seus significados são muito mais importantes do que as diferenças para o objectivo deste trabalho, conforme ficará patente ao longo do mesmo.

Alguns dados resultantes da pesquisa efectuada permitiram detectar *erros pontuais de ordem conceptual no ensino da Física do nosso país* que, pelas suas características, não cabem dentro das designações acima referidas (Santos, 1991, p. 43), mas que também influenciam negativamente o ensino. Alguns desses *erros conceptuais* de ordem pontual também serão revelados neste trabalho, mas o seu carácter assistemático faz com que a nossa preocupação não se centre neles. (6)

1.3. Fundamentação da escolha deste problema

Ao debruçarmo-nos sobre este problema procurámos, por um lado, *contribuir para um dos campos de investigação em educação que se revela mais por explorar*, e, por outro, *prestar um serviço positivo à causa da formação dos professores de Física e ao ensino dessa ciência no nosso país*.

Por paradoxal que pareça, ainda que a escola moderna tenha feito deslocar (e ainda bem!) o centro de gravidade do «binómio» professor-aluno para o lado deste, é cada vez mais decisivo o papel que cabe aos professores no processo de ensino. Mas, infelizmente, é escassa a investigação que tem sido efectuada tendo como objecto fulcral o professor de Ciência. Tal como afirma Baird (1988, p. 61), *"é necessário efectuar-se muita pesquisa sobre as concepções dos professores (particularmente acerca dos aspectos em que acreditam) para compreender o modo como essas concepções influenciam o seu rendimento intelectual durante as planificações das lições e durante as suas interacções com os estudantes na sala de aula"*. Os professores de Física são *"mais preciosos que rubis"* (Woolnough, 1988, p. 65) mas sentem-se cada vez mais desmotivados e desamparados, pelo menos a nível da Europa (Physics World, Junho de 1991, p.39), onde aliás têm vindo a escassear de modo assaz preocupante. Esse desamparo, que é notório por todo o lado, não é só a nível social, mas é também a nível de formação. No nosso país existe uma grande percentagem de professores a leccionar Física mas que dispõem, quando muito, apenas de uma razoável preparação para ensinar Química, por terem concluído cursos que não foram concebidos para formar professores, mas para o mundo da tecnologia química. Em face do exposto, cremos que toda a investigação cujos resultados possam vir a beneficiar, *de modo directo e imediato*, os professores de Física que ensinam no nosso país, se revela fundamental.

Foi o contacto directo com centenas de professores de Física do ensino básico e secundário de quase todo o país, o sentir as suas carências e os seus anseios, que nos levou a dedicar esta investigação a esses professores e a centrá-la no seu ensino.

Podemos referir, sem receio de errar, que a investigação no domínio das Ciências de Educação tem tido pouca influência no comportamento dos professores de Física do nosso país, a exemplo aliás do que sucede noutros países (Baird, 1988, p.55). Este facto, que tem sido profundamente pernicioso para a educação científica dos jovens (e

cujas repercussões no mundo tecnológico em que viverão estão longe de estar previstas), ainda mais reforçou a ideia de centrarmos esta investigação nos próprios professores, e de a planificarmos de modo a poder ser-lhes útil.

E porquê a escolha de um tema que se centra nas *concepções alternativas no ensino* para fulcro desta investigação?

As histórias da Filosofia e da Ciência revelam-nos exuberantemente como pensadores extraordinários tiveram concepções incorrectas, dir-se-ia, mesmo, ingenuamente incorrectas. Por outro lado, e embora o pensamento científico seja por natureza antidogmático, tal facto não obsta a que grandes cientistas como Darwin, por exemplo, tenham resistido à alteração das suas ideias, mesmo depois de confrontados com fortes argumentos contra elas (Barber, 1961).

Se grandes cientistas tiveram concepções incorrectas e assumiram, por vezes, atitudes dogmáticas, será de estranhar que o mesmo suceda com alunos e professores?

Tem sido realçado em vários países o facto de existirem "*sérias lacunas na compreensão conceptual dos professores de Física*", principalmente no domínio da Mecânica (Mc. Dermot, 1984; Kirkwood, Carr e Chesney, 1986, Arzi, White e Fensham, 1987, etc.). Infelizmente, porém, tem sido reduzida a investigação nesse campo, considerado fundamental, conforme, aliás, já se destacou (Baird, 1988, p. 61). E é por haver pouca investigação acerca das concepções dos professores que poucos foram os artigos de pesquisa nesse campo que conseguimos descobrir até ao momento, ainda que tenhamos feito uma ampla consulta ao importante banco de dados DIALOG INFORMATION SERVICE e, em particular, à sua primeira base de dados, a ERIC -*Educational Resources Information Center*, talvez a mais importante rede de informação de documentos de educação. Além disso, também efectuámos uma investigação bibliográfica bastante exaustiva (na maioria dos casos consultando todos os números de há duas décadas ou mais para cá) sobre as importantes revistas científicas que se seguem:

- International Journal of Science Education;
- School Science Review;
- Journal of Research in Science Teaching;
- Physics Education;
- The Physics Teacher;
- Physics Today;
- American Journal of Physics;
- Gazeta de Física da S.P.F.;
- Revista de Ensino de Física da S.B.F.;
- Revista Española de Física;
- Enseñanza de las ciencias.

A importância do tema desta investigação não necessita de ser realçada. É sobejamente conhecido que as concepções do professor acerca do conteúdo e natureza da ciência, as suas ideias científicas e pedagógicas, constituem um dos aspectos que mais influencia a sua actividade na sala de aula e, conseqüentemente, têm grande repercussão nas representações de cada aluno acerca dos fenómenos naturais (Schavelson, 1983; Hewson and Hewson, 1987). E é hoje amplamente reconhecido que as ideias prévias do aluno comandam decisivamente a sua aprendizagem da Física.

Assim, por exemplo, num relatório sobre a situação da investigação recente em educação científica, pode ler-se que *"há um acordo generalizado de que os alunos constroem activamente a sua própria visão do mundo com base nas suas observações e experiências pessoais, e que eles reagem à educação formal em função dessas perspectivas intuitivas pré-existentes"* (Linn, 1986, p. 7).

O "acordo" a que Linn se refere existe, de facto, entre os investigadores em ensino da Ciência, fruto de um número nunca visto de experiências levadas a cabo na sala de aula. Seria fastidioso e até mesmo impossível, num trabalho desta natureza, pormenorizar todas as investigações acerca das concepções alternativas dos alunos de Física divulgadas pelas revistas de investigação em educação científica. Mas consta neste trabalho uma parte dedicada às mais importantes e conhecidas concepções alternativas dos alunos, no domínio da Mecânica, que inclui uma sistematização das suas características, de modo a tornar possível uma comparação entre as representações dos alunos, dos professores de Física e da própria Física.

E porque se decidiu pesquisar representações alternativas e outros aspectos menos correctos nos *manuals escolares*, como parte integrante desta investigação?

Esta decisão baseou-se, em primeiro lugar, na nossa experiência de autor de *manuals escolares* adoptados em várias escolas do país ao longo de 20 anos. Sempre nos apercebemos de que os professores, no seu ensino, atribuem grande importância ao que está escrito nesses *manuals* e seguem-nos à risca (7).

Por outro lado, a investigação educacional tem confirmado que "*o conhecimento dos professores é na realidade o resultado da interacção entre os seus conceitos alternativos e o conhecimento apresentado nos livros que utilizam para preparar as suas aulas*" (Vasconcelos e Loureiro, 1988, p.104). Ora, acontece que todos os livros que os professores adoptam (sem qualquer excepção!) apresentam por vezes, como se verá neste trabalho, determinadas concepções e algumas estratégias que só poderão mesmo vir a reforçar esquemas alternativos nos professores e nos alunos que os utilizam. Para além disso, aparecem ideias que, subtilmente incorrectas, contribuem para a confusão de professores e alunos, e para o afastamento destes da Física.

Ao contrário do que sucede com a investigação das representações incorrectas dos alunos, é, como já referimos, escassa a pesquisa sobre as concepções dos professores. Muitas destas representações foram-lhe inculcadas aquando da sua formação como alunos. Outras provêm, como também já afirmámos, da sua interacção com os manuais escolares. Estes constituem, aliás, recursos educativos considerados privilegiados pela Lei de Bases do Sistema Educativo, *"a exigirem especial atenção"*, conforme é reconhecido no Artº 41, Nº 2 da referida Lei.

Além disso, um questionário que cinco investigadores da Universidade de Aveiro (INEA/FQ, 1989) efectuaram a 521 professores de Física e Química permitiu concluir que *"mais de 90% dos professores consideram razoavelmente importante ou muito importante os manuais escolares como fontes de informação no seu ensino"*, sendo outra conclusão a de que *"77% dos professores utilizam frequentemente ou quase sempre o manual escolar na preparação das suas aulas"*. Se os manuais escolares são assim tão importantes, justifica-se esta e todas as outras investigações que sobre eles se efectue.

No campo da Física temos conhecimento de um número reduzido de trabalhos estrangeiros incidindo sobre manuais (French, 1993, Gil e Solbes, 1993, Bauman, 1992, Haslett, 1992, Mak e Young, 1987, Ogborn, 1986, Summers, 1983 e poucos mais). Ao longo de toda a história da Gazeta de Física da SPF (Sociedade Portuguesa de Física), que começou a publicar-se em Outubro de 1946, só surgiram três artigos sobre manuais. Isto leva-nos a concluir que é muito reduzida a investigação até hoje efectuada tendo por base esses importantes instrumentos de aprendizagem.

Tendo então presente que *"há enquadramentos conceptuais alternativos presentes na generalidade dos livros de texto elementares..."* (Pereira, 1988) procurámos, com este trabalho, contribuir para o seu estudo e divulgação.

Em suma:

Apostámos numa investigação centrada nos professores e nos manuais que utilizam, porque acreditamos que *"o futuro da educação científica não está, em primeiro lugar, no currículo ou na tecnologia. Está, sim, no professor"* (Baird, 1988, p. 70).

1.4. Valor teórico desta investigação

Esta investigação integra-se no chamado *movimento das concepções alternativas* que continua em marcha. Foram alguns importantes estudos de epistemólogos e psicólogos notáveis tais como Piaget, Vigotsky, G. Kelly, Bachelard, Kuhn, Popper, Ausubel, etc. que, contribuindo para a fundamentação do carácter construtivista das representações acerca da realidade, com destaque para a poderosa influência que as concepções prévias de cada ser humano têm no seu conhecimento do mundo, motivaram esse *movimento* na investigação em educação científica (Thomaz, 1987; Villani, 1989; Santos, 1991). A ele corresponde uma nova forma de encarar o papel do aluno no acto educativo, como transparece desta afirmação lapidar e paradigmática de Ausubel:

" Se eu tivesse que reduzir a um único princípio toda a psicologia educacional diria o seguinte: o factor mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já conhece. Descubra o que ele sabe e baseie nisso os seus ensinamentos." (1980, p. rosto).

Tendo em conta o facto de o professor, através das suas ideias, e através das estratégias que adopta, até poder vir a reforçar as concepções alternativas dos alunos, mais se valoriza todo o esforço feito para descobrir quais são verdadeiramente as ideias dos professores.

Além disso, um trabalho desta natureza contribuirá certamente para que os professores desenvolvam o *metaconhecimento**, reflectindo sobre as suas próprias ideias científicas, o que muito contribuirá para a sua valorização.

A reflexão sobre a natureza do conhecimento científico, e sobre os mecanismos de aprendizagem humana, poderá também influenciar favoravelmente o modo como os professores de Física protagonizam o acto educativo. Justifica-se, portanto, a reflexão que efectuámos sobre alguns importantes trabalhos do domínio da Psicologia educacional e da Epistemologia, tentando destacar os aspectos mais relevantes para a investigação no campo das concepções alternativas em Física, e para a metodologia do ensino desta ciência. Esse estudo contribuiu, aliás, para fundamentar a parte conceptual desta investigação.

Sendo vastíssimo o mundo conceptual da Física, seria demasiado ambicioso que um trabalho desta natureza se debruçasse sobre todo ele. Houve que restringir o âmbito deste trabalho a uma das áreas da Física e optou-se pela Mecânica. Por que motivo se escolheu a Mecânica?

Não foi por acaso que a Mecânica atingiu, antes do que as outras áreas da Física, o seu pleno desenvolvimento. Os modelos baseados nessa área conceptual estão na base de uma melhor compreensão das outras áreas da Física e de outras ciências. Conforme afirma Claramonte (1972, p. 9), a Mecânica, devido ao seu enorme poder previsivo e explicativo, "*transformou-se no modelo metodológico da Ciência*". De facto, com os *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, de Newton, a realidade física revela-se de uma forma mecanicista, com repercussão notável no campo filosófico. Não admira, pois, que se tenha revelado historicamente duradoira a tentativa de reduzir ao quadro

conceptual da Mecânica newtoniana toda a explicação dos fenómenos naturais. Esse quadro teórico acabou por fundamentar todo o campo conceptual da Termodinâmica, através da Mecânica estatística, e grande parte dos campos da Física dos três estados da matéria. Mesmo o próprio estudo da outra grande área da Física anterior ao séc. XX, o Campo Electromagnético, que abarca a Óptica, assenta conceptualmente no estudo da Mecânica, sendo um facto, por exemplo, que a compreensão da energia electromagnética e a sua propagação ondulatória pressupõe a compreensão prévia da energia mecânica e das ondas mecânicas. Todo o estudo do conhecimento físico elementar não poderá, pois, deixar de assentar na Mecânica, e daí a sua importância nos *currícula* do ensino secundário.

1.5. Valor prático desta investigação

Pretendendo-se, como já se disse, produzir uma investigação cujo produto final possa interessar verdadeiramente os professores de Física do nosso país, é caso para nos interrogarmos se eles estarão sensibilizados para a importância das representações incorrectas no seu ensino e na aprendizagem dos seus alunos.

No questionário do INEA/FQ, a que atrás já fizemos referência, uma grande maioria (cerca de 90%) dos professores inquiridos considerou "*razoavelmente importante ou muito importante que os alunos se apercebam das ideias intuitivas que eventualmente possuem sobre os conceitos de Física e de Química, de modo a facilitar-lhes uma construção mais adequada dos mesmos*" (p.16), mas apenas uma minoria (cerca de 30%) consideram "*razoavelmente elevado ou muito elevado o grau de consecução desse objectivo*".

Estes resultados não são de espantar já que muitos professores do ensino pré-universitário português vivem, por vários motivos, afastados dos resultados das investigações em Ciências de Educação e, por essa razão, e pelas condições difíceis em que trabalham, ainda têm uma prática pedagógica que se afasta do princípio metodológico básico na chamada *educação moderna*, segundo o qual **o aluno é o elemento central estruturante e estruturador da sua própria aprendizagem**.

Assim, muitos professores não chegam sequer a tomar consciência de que os seus alunos têm concepções mais ou menos empíricas e espontâneas, que influenciam enormemente a sua aprendizagem, e que, devido ao seu grande *poder social** sobre os alunos, as suas próprias ideias influenciam enormemente o modo como evoluem as representações dos alunos.

A chamada "*ciência do professor*" (Gilbert, Osborne e Fensham, 1982) engloba, de onde em onde, esquemas conceptuais diferentes dos da chamada "*ciência do cientista*", paradigmaticamente estabelecida (Kuhn, 1962). O professor, fazendo uso desses esquemas, vai muitas vezes actuar como agente reforçador ou mesmo desencadeador de concepções alternativas dos seus alunos, contribuindo assim para levantar "*barreiras do pensamento ao pensamento*" com que os alunos acabam por se confrontar, e que dificultam a sua aprendizagem (Bachelard, 1977) .

Creemos, portanto, que esta investigação, incidindo fundamentalmente sobre os esquemas mentais que os alunos e os professores dos ensinos básico e secundário utilizam na área da Mecânica, tem um interesse prático incontestável.

Além disso, vive-se um período de reforma do sistema educativo português, em que se torna decisivo aproveitar a oportunidade para melhorar, com fundamento científico e não apenas intuitivo, os programas, métodos e manuais para o ensino da Física (e de todas as outras disciplinas, claro). Este facto ainda mais vem reforçar a importância desta investigação, pois os seus resultados poderão eventualmente fornecer elementos preciosos aos autores dos programas do ensino básico e secundário.

1.6. Fases da investigação

Começámos por passar em revista, criticamente, alguns livros acerca da metodologia a adoptar numa investigação educacional. O livro de Bruce Tuckman, *Conducting Educational Research* (1978), foi todo analisado. Porém, para além de indicações preciosas, por exemplo, sobre jornais, revistas e bases de dados, pouco mais contributos tirámos deste bom livro. E porquê? Porque aponta para uma *investigação* de índole *experimental, quantitativa*, inspirada na que se faz nas chamadas *ciências duras* (8), quando o tipo de investigação que pretendíamos aqui efectuar era de índole *conceptual, qualitativa*. O livro de Tuckman é muito útil para quem pretende efectuar uma investigação acerca da relação entre duas ou mais variáveis como, por exemplo, investigar em que medida uma dada estratégia de ensino beneficia ou não a aprendizagem. Aplica-se essa estratégia de ensino a um grupo de alunos, arranja-se um outro grupo de controlo adequado, e compara-se estatisticamente a consecussão dos dois grupos. Ora esta investigação lida com aspectos cognitivos que exigem uma metodologia mais qualitativa, e foi em grande parte levada a cabo com professores, o que complica extraordinariamente a possibilidade de se efectuarem trabalhos desse tipo.

Por outro lado, tivemos oportunidade de verificar que as últimas teses sobre ciências de educação consultadas em bibliotecas americanas, particularmente as da educação em Física, têm actualmente um carácter muito mais qualitativo do que há alguns anos atrás, a que talvez não seja estranho o facto de ter havido uma mudança de um paradigma comportamentalista para um paradigma cognitivista na educação. E esta mudança não ocorreu só na América. Tal como afirmou o Prof. Marco Moreira, na conferência inaugural do 3º Encontro Ibérico sobre o Ensino da Física, em 1993, “*em termos metodológicos, a investigação passou, progressivamente, de uma focagem essencialmente quantitativa, na década de sessenta, para uma abordagem qualitativa nos dias actuais*”.

Foi em Julho de 1992, quando participámos num seminário intensivo de 15 dias na Universidade de Cornell, intitulado *Learning how to learn* (9), que tomámos uma decisão definitiva acerca da metodologia a adoptar nesta investigação. Já possuíamos um conhecimento vago acerca de um novo instrumento conceptual e metodológico de construção de conhecimento, designado por «vê» heurístico («vê» epistemológico, ou «vê» de Gowin). Porém, foi só então que as virtualidades desse instrumento, criado pelo epistemólogo D. Gowin, da Universidade de Cornell, nos foram sobejamente demonstradas por Joseph Novak, o orientador do referido seminário. Essa ferramenta revelou-se epistemologicamente muito actual, e não hesitámos em a adoptar.

À escolha do problema e da metodologia seguiu-se um reforço do estudo de livros científicos de diferentes épocas e artigos de revistas científicas de índole histórica sobre concepções mecânicas. Deste modo tentámos registar as representações científicas nessa área em várias épocas, e o modo como elas evoluíram, assim como as representações alternativas que foram aparecendo, e toda a dialéctica subjacente à confrontação entre umas e outras.

Passámos à leitura exhaustiva de todos os artigos de há mais de dez anos para cá de que tivemos conhecimento acerca de concepções físicas e epistemológicas de professores, assim como à leitura de diversos artigos sobre concepções alternativas de estudantes de Física, essencialmente na área da Mecânica.

Seguiu-se um aprofundamento (durante uma licença sabática) dos conhecimentos sobre Filosofia da Ciência e, particularmente, sobre a Epistemologia moderna, de modo a poder apoiar mais fortemente a investigação no campo epistemológico, valorizando, desse modo, a sua parte conceptual.

Pesquisámos, depois, a existência, nos manuais escolares que os professores de Física têm utilizado no seu ensino, de conceitos e esquemas de raciocínio sobre Mecânica que divergem das representações científicas recolhidas dos livros e revistas de Física actuais.

Passámos, finalmente, a uma reflexão sobre a génese dessas concepções discrepantes que os professores utilizam, e das suas eventuais repercussões nos seus alunos.

Para apoiar a investigação, desenvolvemos todo um trabalho paralelo que consistiu:

- na orientação de dois cursos de relatividade restrita dados a professores do ensino básico e secundário das regiões de Lisboa e Almada, no final dos quais lhes foi distribuído um questionário destinado a pesquisar a existência ou não de determinadas representações alternativas;
- na análise das respostas a esses questionários e registo de algumas conclusões importantes;
- na produção de uma comunicação sobre esse estudo feito com professores de Física, comunicação essa que foi apresentada e discutida no Third International Seminar «*Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*», realizado em Agosto de 1993 na Universidade de Cornell, e que consta das actas desse seminário publicadas em suporte electrónico;
- na publicação na «*Gazeta de Física*», da Sociedade Portuguesa de Física, de dois artigos sobre o conceito de massa (os artigos foram publicados em números recentes dessa revista);
- na publicação na revista «*Química*», da Sociedade Portuguesa de Química, de dois artigos sobre o conceito de energia;
- na publicação na «*Revista Brasileira de Ensino de Física*» de dois artigos sobre o conceito de massa;

- na publicação na «*Revista de Educação em Física*», do Departamento de Educação da Faculdade de Ciências de Lisboa, de um artigo sobre o pensamento espontâneo dos professores de Física a respeito da relatividade das grandezas mecânicas;
- na orientação de *duas oficinas pedagógicas* no «*4º Encontro Ibérico sobre o Ensino da Física*», realizado na Covilhã, que proporcionaram a oportunidade de distribuir um questionário destinado a pesquisar concepções epistemológicas dos professores de Física portugueses, cujos resultados também constam desta tese;
- na orientação de uma «*acção de formação para professores de Física*» da área de Santarém organizada pela Sociedade Portuguesa de Física, onde houve a oportunidade não só de dilatar a amostra de pesquisa sobre as concepções epistemológicas de professores de Física portugueses, como também de verificar o modo favorável como os professores presentes aderiram a muitas das ideias essenciais que constam deste trabalho;
- na apresentação de uma *comunicação* no «*5º Encontro Ibérico sobre o Ensino da Física*», realizado em Santiago de Compostela, onde tivemos a oportunidade de discutir os resultados do questionário, atrás referido, sobre as concepções epistemológicas dos professores de Física portugueses;
- numa *conferência* pronunciada no «*5º Encontro Ibérico sobre o Ensino da Física*», realizado em Santiago de Compostela, onde apresentámos algumas das conclusões a que chegámos e sugestões para a melhoria da educação em Física delas decorrentes.

Alguns dos artigos publicados constituem apêndices a este relatório de tese. O ter submetido à opinião pública de físicos e químicos e um grande número de professores portugueses alguns dos trabalhos produzidos nesta investigação foi intencionalmente combinado entre o investigador e o seu orientador. Esta é uma prática que ocorre em países estrangeiros que, para além de permitir ir avaliando construtivamente o trabalho que está sendo desenvolvido, oferece a vantagem de arriscar mais a credibilidade do trabalho de investigação, aliviando, deste modo, a responsabilidade de quem tem de ajuizar sobre ele.

1. 7. Algumas considerações de natureza ética

Na obra de orientação de investigações atrás referida, *Conducting Educational Research* (1978), considera-se, e bem, que são de salvaguardar, em toda a investigação educacional, os seguintes direitos:

- o direito à privacidade ou não participação;
- o direito de anonimato;
- o direito à confidencialidade;
- o direito à responsabilidade por parte do investigador.

Infelizmente, nem sempre se têm na devida conta estas regras da mais elementar justiça social, com efeitos perniciosos do ponto de vista ético. Pretende-se deixar aqui expresso, com toda a veemência, que foram respeitados escrupulosamente estes direitos. Assim, criaram-se condições para que os questionários fossem anónimos e, de modo algum, transparecessem resultados provenientes deste ou daquele professor, deste ou daquele manual que pudessem ferir a dignidade de alguém. Trabalhámos com base num código, pelo que todos os manuais portugueses que consultámos têm uma referência secreta. A esse código só teve acesso o Professor orientador da tese e os Professores que nos concederam a honra de analisarem a tese.

CAPÍTULO II

PROBLEMATIZAÇÃO E METODOLOGIA

2.1. O «vê» epistemológico

A figura que se segue representa o *vê* (V) epistemológico, ou *vê* de Gowin, (Gowin, 1990; Novak e Gowin, 1991), que, como já afirmámos, constitui o instrumento conceptual e metodológico em que se baseia a presente investigação.



Com base no *vê* vamos, em seguida, referir-nos às diversas componentes da estrutura da investigação em que estivemos envolvidos.

2.2. A questão central

A **questão central**, **questão foco** ou **questão expressiva** (*telling question*), que orientou todo o nosso pensamento, foi a seguinte:

Como é que as representações que os professores de Física do nosso país «negoceiam» com os alunos se relacionam com a ciência física e a reflexão que sobre essa ciência é feita na Epistemologia?

Para operacionalizar a questão central desta investigação, formularam-se algumas sub-questões para as quais procurámos encontrar respostas, a saber:

- *Como evoluiu o conhecimento e o metaconhecimento* acerca do mundo físico ao longo da história? Quais são as ideias-chave mais consensuais extraídas da epistemologia actual?*
- *Que características gerais apresentam as concepções alternativas dos estudantes de Física? Qual é a sua génese?*
- *Que características gerais apresentam as concepções alternativas dos professores de Física? Qual é a sua origem? Há alguma comparação possível entre as concepções alternativas dos professores e as dos alunos? Caso afirmativo, quais as analogias e diferenças?*
- *Haverá algum paralelismo entre a ontogénese* e a filogénese* das ideias físicas?*
- *Que características apresentam as representações divergentes que surgiram na história da Ciência acerca dos mesmos objectos/fenómenos? Haverá algum fundamento para a divergência conceptual entre cientistas ou escolas científicas?*

- *Há alguma comparação possível entre as concepções heterodoxas, na construção histórica da Ciência, e as concepções alternativas dos professores e dos alunos de Física?*
- *Como ocorre a confluência entre as representações dos cientistas, as representações dos professores e as representações dos alunos na sala de aula?*
- *Será importante, para o acto de compartilhar significados que ocorre na sala de aula, a posição dos professores face a problemas debatidos na Epistemologia?*

O caminho para as respostas às questões anteriores, ainda muito gerais, passa pela pesquisa centrada em questões mais concretas como as que se seguem:

- *Quais são as concepções alternativas dos estudantes no domínio da Mecânica que a investigação educacional tem descoberto?*
- *Que disparidades existem entre as concepções mecânicas desenvolvidas nos livros de consulta dos professores de Física, nos manuais que usam, e nas revistas didácticas de Física que servem de base à sua formação? Quais dessas concepções se poderão considerar como concepções alternativas?*
- *Que podemos inferir de alguns grandes debates científicos que ocorreram ao longo da história da Física? O que nos ensina a história acerca do modo como evoluíram as ideias após esses grandes debates?*
- *Como evoluíram historicamente as principais ideias acerca do movimento? Que têm descoberto os estudos de Psicologia genética acerca do modo como evoluem essas ideias no ser humano desde que nasce?*

- *Será que as concepções heterodoxas dos cientistas, professores e alunos terão algumas origens comuns? Poderemos falar também em concepções alternativas na própria Física?*
- *Que papel desempenham os livros utilizados e os programas curriculares na formação de concepções alternativas que se disseminam pelos professores e pelos alunos?*
- *Quais as posições epistemológicas que, mais ou menos inconscientemente, predominam entre os professores de Física acerca da possibilidade do conhecimento pleno da realidade física que nos cerca, da origem do conhecimento físico, da natureza das ciências físicas, do que fundamentalmente as distingue das demais ciências (e das pseudo-ciências), do papel do erro na construção do conhecimento científico, do papel da experiência, etc? Qual é a coerência entre essas posições e as ideias chave mais consensuais extraídas da Epistemologia? Como é que são encaradas as potencialidades pedagógicas dos diversos métodos de ensino da Física?*

2.3 Os acontecimentos/objectos

As questões anteriores, que organizaram e dirigiram o nosso pensamento, suscitaram-nos os **acontecimentos/objectos** educativos (Gowin, p. 90) a investigar. Foram eles:

- **livros e comunicações acerca de concepções alternativas, particularmente no domínio da Mecânica;**

- **manuals escolares e livros de consulta de Física mais adoptados no passado e no presente nas escolas portuguesas;**
- **livros e comunicações acerca da epistemologia actual;**
- **questionário aplicado a professores de Física;**
- **escala de graduação (*rating scale*) aplicada a professores de Física;**
- **diálogos com professores de Física numa conferência realizada no 5º Encontro Ibérico sobre o Ensino da Física, que teve lugar em Santiago de Compostela, em 3 acções de formação realizadas em Portugal e em 9 comunicações (orais e em poster) em encontros que ocorreram em Portugal, Espanha e um na Universidade de Cornell.**

Estes acontecimentos/objectos proporcionaram-nos **registos/factos*** (Gowin, 1990, p. 28). Os factos, para além de resultarem de registos efectuados com base nos acontecimentos/objectos atrás referidos, pressupõem que foram feitos juízos favoráveis acerca do valor desses factos (no que se refere ao seu contributo para responder às questões formuladas, com base nos acontecimentos/objectos analisados).

Toda a análise dos acontecimentos/objectos levada a cabo procurou ser o mais objectiva possível. Mas, se na investigação da própria Física, muito mais objectiva, o factor pessoal não deixa de ter uma influência comprovadamente importante, como é que os registos apontados como factos importantes, neste campo muito mais subjectivo da Didáctica da Física, poderão deixar de estar imbuídos de uma componente pessoal? Seria impossível despirmo-nos de toda a estrutura mental resultante da experiência que, no caso pessoal vertente, corresponde a cerca de 30 anos de ensino da Física.

2.4 Os conceitos utilizados

Os **conceitos** são fundamentais para a construção de qualquer teoria uma vez que compreendemos as teorias através do raciocínio e raciocinamos com conceitos (1). O significado de um conceito assenta sempre nos significados de outros conceitos. Assim, por exemplo, para dar significado ao conceito de inércia necessitamos dos conceitos de corpo e movimento. Para atribuir significado, por exemplo, ao conceito de aprendizagem significativa, precisamos dos conceitos de *estrutura cognitiva** e *subsunção**. Acabamos sempre por cair num complexo entrelaçamento de conceitos em que uns adquirem significado a partir de outros e que origina, por vezes, a queda em situações de ciclo vicioso, ao definir-se o conceito A com base no conceito B e o conceito B a partir de A.

Muitos foram os conceitos envolvidos neste trabalho e, de todos eles, procurámos dar uma definição tão clara quanto possível. O pretendermos dar um significado, o nosso significado, de modo preciso, a cada conceito utilizado, não significa que tenhamos uma visão dogmática acerca dos mesmos (2). Por isso, não hesitámos em discutir conceitos aparentemente tão sólidos como o de massa, e muito menos nos privámos de pôr em questão conceitos tão discutíveis como o de aprendizagem. Mas, para podermos questionar o significado atribuído a um conceito, teremos de ter acesso a esse significado de modo claro, sem ambiguidades. Do mesmo modo, para nos interrogarmos acerca do valor de uma dada teoria, teremos de compreendê-la bem, o que passa por uma clareza no significado atribuído aos conceitos envolvidos e no modo como estão relacionados. Clareza não significa dogmatismo. Significa capacidade de discussão e, portanto, antidogmatismo.

Acreditamos que é possível escrever acerca do fenómeno complexo da educação (neste caso da educação em Física), sem "*mergulhar nas ambiguidades da sua linguagem*" (Gowin, 1990, p. 24).

E acreditamos também que, deste modo, os próprios factos que fomos registando poderão eventualmente contribuir para aprimorar alguns conceitos e teorias, pelo menos no que se refere ao significado por nós compreendido.

Entre os **conceitos** mais relevantes que, de uma forma mais ou menos explícita, intervieram neste trabalho contam-se:

- no domínio das ciências da educação:

- **educação, ensino, aprendizagem e meta-aprendizagem*, curriculum, governança*, cognição e metacognição*;**
- **representação*, estrutura cognitiva*, subsunção*, diferenciação progressiva*, reconciliação integrativa*, aprendizagem significativa*, concepção alternativa*;**
- **mapa conceptual* (de Novak) e diagrama epistemológico (de Gowin);**
- **avaliação*, validade* e fidelidade*.**

- no domínio da Física:

- **energia, calor, trabalho, forma de energia, conservação da energia, degradação da energia e entropia;**
- **inércia, massa, massa própria, massa em repouso e massa relativista;**

- **referencial, relatividade do movimento, contracção espacial relativista e dilatação temporal relativista;**
- **movimento, velocidade, aceleração e quantidade de movimento;**
- **força e peso.**

2.5 Os princípios adoptados

A investigação assentou em **princípios**, que constituem algumas concepções adquiridas ao longo da nossa experiência anterior. Funcionaram como hipóteses de trabalho plausíveis, sujeitas a ser revistas no decurso desta investigação.

Esses *princípios* que adoptámos foram os seguintes:

- no campo educativo:

- **a educação, como processo de mudar o significado da experiência humana, pode ser melhorada desde que se tenham em conta os resultados da investigação em educação e se valorizem os factores que a influenciam: a governança, o *curriculum*, a aprendizagem e o ensino;**
- **o conhecimento de cada ser humano vai sendo construído com base na interacção entre o conhecimento já possuído e os objectos e acontecimentos;**

- a aprendizagem, como processo individual de reorganização dos significados na estrutura cognitiva de cada indivíduo, é idiossincrásica e profundamente influenciada pelos conhecimentos já existentes na estrutura cognitiva;
- há razões para a existência de concepções alternativas no ensino da Física e de outras disparidades entre as ideias ensinadas e as ideias cientificamente aceites;
- as estratégias de ensino que os professores desenvolvem, e que muito influenciam a aprendizagem dos alunos, dependem de pressupostos epistemológicos.

- no campo da Física:

- todos os princípios da Mecânica Clássica;
- os dois princípios da Teoria da Relatividade Restrita.

A estes princípios vieram a juntar-se toda uma série de **princípios epistemológicos** que acabaram por ser estabelecidos com base numa longa reflexão de carácter filosófico. Esses princípios sobre o metaconhecimento científico serão estabelecidos no capítulo seguinte, e consideramo-los importantes num trabalho desta natureza.

2.6 A transformação de factos em dados e os juízos acerca dos mesmos

Os factos recolhidos foram transformados em **dados** ou **resultados**, para cujo significado muito contribuíram os conceitos e princípios utilizados. Esta transformação teve em vista organizar as nossas observações de modo a permitir-nos construir as respostas à questão foco. Dado o carácter eminentemente qualitativo desta investigação, essa transformação consistiu fundamentalmente numa profunda análise qualitativa dos factos recolhidos.

Acreditamos que os **juízos de índole cognitiva** (*knowledge claims*), como respostas às questões formuladas construídas a partir da investigação efectuada, são coerentes com os dados recolhidos. Como construções humanas, têm sempre inerentes a possibilidade de erro, daí a designação adoptada (Gowin, 1990, p. 102, Novak e Gowin, 1991, pp. 61 e 171).

Ao construir os juízos de índole cognitiva, estamos a atribuir valor à nossa investigação e aos conceitos e teorias que a suportam e orientam. Outros investigadores poderão, no entanto, ter um quadro de valores de referência diferente e/ou dispor de outros dados diferentes dos nossos e, assim, não admira que possam atingir outras conclusões. Estas, principalmente em educação, dependem grandemente do contexto em que decorre a investigação. No caso desta investigação, embora tenhamos tido o cuidado de recorrer a ampla literatura internacional e confrontar os nossos resultados com resultados de investigações similares em outros países, há que ter em conta factores que influenciam o modo como decorre a educação científica no nosso país, entre os quais destacamos como decisivos os professores que temos, os alunos que povoam as nossas escolas, os *curricula* que têm sido adoptados e a governança. Esta dependência do contexto não retira qualquer valor ao trabalho produzido, desde que haja nele total coerência interna e coerência com os dados que recolhemos.

O relativismo contextual é ainda muito mais acentuado no que respeita aos **juízos de valor educacional** que são afirmações genéricas que têm que ver com o processo educativo na sua complexidade. Eles resultaram dos juízos de índole cognitiva, mas pretendem ter um valor educativo e contribuir para a valorização da educação em Física no nosso país (3).

Variados exemplos da história do pensamento mostram que a adesão aos juízos de valor educacional, ainda que bem formulados e bem fundamentados em boas investigações, nem sempre é imediato. Mas se essas afirmações tiverem valor, elas acabarão mais tarde ou mais cedo por recolher a adesão de uma comunidade significativa de educadores.

2.7 As teorias subjacentes e a mudança conceptual ocorrida acerca das mesmas

Se os juízos resultaram dos dados recolhidos tendo por base os conceitos, os princípios e as teorias, também sucedeu que esses juízos nos obrigaram a rever estes conceitos, princípios e teorias *a priori* defendidos. Referimo-nos, particularmente, aos do campo educativo que, pela sua natureza, são mais sujeitos a flutuações. Mas não só! Fomos obrigados a rever algumas das concepções didácticas e científicas que perfilhávamos. Por exemplo, o nosso conceito de massa foi claramente modificado no decurso desta investigação. E, com isso, mudou também a visão que tínhamos acerca de uma parte importante da teoria da relatividade: a que tem a ver com a relação entre a massa e a energia.

Entre as **teorias** que estiveram subjacentes a esta reflexão destacamos, pela sua importância,

no campo físico:

- a **Mecânica Clássica**, por conter o quadro conceptual essencial em torno do qual girou este trabalho;
- a **Teoria da Relatividade Restrita**, não só pela sua importância epistemológica (como bom exemplo de aplicação das ideias filosóficas que defendemos), como pelo apoio que dá a alguns dos conceitos com que trabalhamos.

no campo educativo:

- a **teoria da educação de Novak e Gowin** porque é, das que conhecemos, a que assenta em conceitos e em pressupostos filosóficos que mais se identificam com os que defendemos;
- a **teoria de Ausubel** (Ausubel, Novak e Hanesian, 1980) pelo apoio conceptual que dá à teoria de Novak e Gowin.

2.8 Um lampejo da posição filosófica subjacente a este trabalho

Subjacente a qualquer teoria e a qualquer trabalho, mesmo do campo das ciências ditas exactas, existe sempre uma **posição filosófica**, assumida mais ou menos conscientemente.

Com este trabalho sucedeu o mesmo. Estamos consciente de que, já à partida, perfilhávamos determinadas perspectivas filosóficas. O próximo capítulo deste trabalho revelará em que medida essas nossas ideias evoluíram.

De um modo sintético poderemos afirmar que já há alguns anos defendíamos uma **perspectiva filosófica pluralista**, muito próxima da de Bachelard. Segundo ela, existem diversas relações dialécticas inerentes ao conhecimento, concretamente as relações sujeito que conhece-objecto de conhecimento, razão-experiência, teoria-prática e hipóteses-factos.

No fundo, trata-se de uma posição em que **empirismo e racionalismo não são vistos como posições filosóficas irreconciliáveis, mas, pelo contrário, contêm ambos um potencial significativo no que respeita à reflexão sobre a ciência e o modo como esta se constrói, o mesmo sucedendo com as antíteses realismo-idealismo e dogmatismo-cepticismo.**

Perfilhávamos, também, desde há vários anos, quando lemos a obra «*As Revoluções Científicas*» de Kuhn (Kuhn, 1970), uma **epistemologia descontinuista** segundo a qual o progresso do saber se faz por rectificações ou mesmo confrontações e refutações que originam descontinuidades nas linguagens, nos métodos e nas técnicas.

Igualmente assumimos há já algum tempo, e até publicamente, uma **posição cognitivista construtivista**. Acreditávamos que o primeiro conhecimento, as primeiras ideias, surgem na criança como surgem; mas sobre essas ideias ela vai construindo o seu próprio saber, à medida que vai ocorrendo o seu desenvolvimento intelectual, fortemente condicionado por factores de ordem biológica, psicológica e sócio-cultural. Essa construção é muito influenciada pelas experiências de aprendizagem pelas quais o aprendiz vai passando.

Estas posições epistemológicas acarretaram necessariamente posições pedagógicas que transparecem nas últimas obras didácticas que escrevemos. Essas posições passam, por exemplo, pela rejeição de um pretenso «*método científico*», linear, sequencial e uniforme e por uma desvalorização das potencialidades da chamada

*aprendizagem por descoberta** (preconizada pelos chamados programas do alfabeto dos anos 60), e por uma posição bastante diferente da da pedagogia tradicional face ao erro. Na nossa actividade de professor dos últimos anos temos procurado encarar os erros dos alunos, não como desastres conceptuais irremediáveis, mas como agentes dinamizadores do nosso ensino e da aprendizagem de cada aluno.

Valor, filosofia, teoria, leis, conceitos, questões, acontecimentos/objectos, factos e conclusões, que, no seu conjunto, compõem o V epistemológico de Gowin, são os elementos que consideramos como componentes da estrutura de todo o conhecimento. Há uma interacção activa entre as componentes conceptual e metodológica dessa estrutura, ou seja entre os dois ramos do V:

- os valores interferem nas filosofias, e estas são relevantes na formação de juízos de valor;
- o que conhecemos (teorias, leis, conceitos) interfere no modo como metodologicamente abordamos os acontecimentos/objectos para obter factos e conclusões acerca da questão básica, e as conclusões traduzem-se por juízos cognitivos que nos conduzem a novos juízos de valor ou a reforçar os que já possuímos;
- as conclusões são explicadas pelo corpo teórico, mas também nos podem levar à sua reformulação, e é o corpo teórico que leva ao levantamento de novas questões;
- são os conceitos que dão significado aos dados, que por sua vez resultam dos factos, mas usamos os factos para aprimorar os conceitos e as leis.

Usar os factos para refinar os conceitos e as leis é, sem dúvida, um dos objectivos de toda a investigação científica, mormente no domínio das ciências da educação onde, dada a natureza imaterial e mutável dos acontecimentos e dos objectos (com muito menor reprodutibilidade do que na área das ciências da natureza), os conceitos e leis são muito mais contextualmente dependentes.

Foi, pois, num processo complexo desta natureza, que nos envolvemos e do qual apresentamos o presente relatório.

CAPÍTULO III

UMA REFLEXÃO EM TORNO DA FILOSOFIA DA CIÊNCIA

3.1. Introdução

Ao definirmos os objectivos desta investigação, propusemo-nos abordar o *problema* da existência das *concepções alternativas* no ensino da Física, e, de um modo geral, o *desfasamento* entre o conhecimento paradigmaticamente aceite pelos físicos e o que é ensinado nas escolas. É um problema complexo, na medida em que não nos pretendemos cingir a mais uma verificação da existência dessas concepções alternativas. Queremos ir mais longe. Entendemos que é necessário reflectir no *porquê da sua existência*. Não serão uma inerência do próprio processo do conhecimento do mundo físico? Não existirão concepções alternativas na própria Física? Será assim tão evidente uma separação entre uma Física considerada rigorosa e infalível e o seu ensino cheio de hesitações e algumas contradições? Não será que a própria natureza do conhecimento científico implicará a existência de concepções alternativas na Ciência? Esta simples hipótese, só por si, faz com que a investigação exija uma reflexão epistemológica com alguma profundidade.

Por outro lado, sabemos que os professores e os autores de livros de Física assumem, mais ou menos inconscientemente, diversas posições filosóficas (Marquit, 1978, p. 784). Por exemplo, quando um autor usa (e abusa) das definições operacionais, está a seguir o *operacionalismo* e a assumir, talvez sem o saber, uma *posição filosófica neo-positivista*, hoje posta em causa. Quando um professor afirma que a Física é o estudo das propriedades que a matéria possui e desenvolve um discurso em que o papel do ser humano, como sujeito cognoscente, é completamente esquecido, está mais ou menos inconscientemente a assumir uma *posição materialista dogmática*, que poderá redundar num realismo ingénuo epistemologicamente inaceitável. Se um professor afirma aos seus alunos que «a Física é uma ciência experimental» porque a fonte de todo o seu conhecimento reside na experiência, está a assumir, mais ou menos conscientemente, uma *posição empirista*. Está, certamente, a desvalorizar o papel da razão na origem do

conhecimento físico, e a ter uma visão pouco actual do papel da experimentação, que não deixa de ser importante.

Em que medida estas diferentes visões do pensamento físico poderão influenciar as concepções ensinadas? Será que o professor que tem uma visão absolutista do valor do conhecimento físico transmite (ou inspira nos alunos) exactamente as mesmas concepções que o que possui uma visão relativista acerca do valor desse conhecimento? Porque será que há professores que ainda falam em «*peso absoluto de um corpo*»? Será o peso do corpo em repouso no espaço absoluto?! Porque há ainda muitos professores que falam em «*peso aparente de um corpo*»? Será que a sua antítese é real? Real porquê?

Os agentes do ensino da Física, pouco habituados a encarar a sua actividade numa perspectiva holística, que englobará necessariamente a problematização do conteúdo com que lidam em termos epistemológicos, aceitam e veiculam mais ou menos passivamente todo o conteúdo e toda a filosofia subjacente que os livros e os seus mestres lhes transmitiram. Também pretendemos, com esta unidade, ajudar os professores que venham a ler este trabalho a ter uma posição mais crítica face aos documentos de trabalho com que preparam as suas lições (1).

As posições epistemológicas desactualizadas não são exclusivas dos professores de Física. Também as vemos espalhadas por muitos investigadores, revelando-se de uma forma inequívoca quando eles, por exemplo, fazem cursos de formação para professores, influenciando estes de modo decisivo.

Em 1984, o cientista e académico francês Jean *Hamburger* foi encarregue pela Academia das Ciências do seu país de organizar um debate entre filósofos e cientistas. Nesse debate, que se revelou bastante vivo, participaram alguns dos maiores cientistas franceses do século XX (como, por exemplo, o matemático René Thom, que se notabilizou pela sua teoria das catástrofes). Dele resultou uma obra muito interessante, intitulada «*La philosophie des sciences aujourd'hui*» (2).

Hamburger considera, no prefácio dessa obra, que *"a aproximação e o diálogo (entre cientistas e filósofos da epistemologia) são mais necessários do que nunca"* (Thom et al., 1988, p. 7). Somos exactamente da mesma opinião, desde que, como ele também afirma no mesmo prefácio, *"sejam definidas as regras antes do jogo"*, querendo dizer com isto que, sendo embora importante debater os diferentes pontos de vista, não há que misturar as duas formas de conhecimento: científica e filosófica. Adiante fundamentaremos este nosso ponto de vista (3).

Outra razão por que nos debruçámos sobre o problema do conhecimento físico foi o facto de o modelo de investigação adoptado neste trabalho -o *Vê epistemológico*- exigir a definição de determinados princípios filosóficos subjacentes à investigação. Conforme Gowin, o autor desse modelo, mostrou de modo claro, uma investigação em educação deve ir muito além de uma simples recolha e análise de dados (1990). Como *interacção entre uma componente conceptual e outra metodológica*, ela inclui a crítica e discussão de conceitos face aos dados recolhidos, bem como reflexões acerca dos próprios juízos cognitivos e da metodologia seguida.

Trata-se de um metaconhecimento, e, por isso, apela para a Filosofia e para as ciências da cognição como uma componente reflexiva intrínseca da metodologia seguida. Determinados princípios filosóficos subjacentes poderão condicionar toda uma investigação a efectuar no campo educativo, e também, por sua vez, poderão ser postos em causa por ela.

No excelente livro *«Doing Science: Images of Science in Science Education»* podemos ler que *"a Ciência nos oferece uma construção da realidade"* (1989, p. 108). Por outro lado, a aprendizagem da Ciência é uma construção pessoal e idiossincrásica, com uma *"activa reorganização de uma rede de significados já existentes"* (Gowin, 1990, p. 124). Essa reorganização pessoal das representações acerca da realidade exterior baseia-se numa confrontação permanente das ideias que já possuímos com os dados, convenientemente analisados e criticados, da percepção sensorial e de toda a informação recebida da comunidade social, veiculada pela linguagem.

O acto dinâmico de ir conhecendo o mundo através da construção e reconstrução de representações é um processo bastante complexo que coloca problemas dos mais variados quadrantes, a começar por problemas de índole filosófica que iremos discutir.

3.2. Demarcação dos problemas a discutir

Mas, afinal, que nos propomos fazer nesta Unidade? Um ensaio sobre a Filosofia em geral? Uma dissertação sobre a filosofia da ciência? Nem uma coisa nem outra, pois tais objectivos estariam completamente fora do âmbito deste trabalho. O que pretendemos é, tão só, fundamentar alguns princípios filosóficos importantes para uma visão actualizada do conhecimento físico, para o ensino da Física e para a presente investigação. Vamos, pois, demarcar o tipo de problemas que nos interessa discutir de modo a autolimitarmo-nos.

A esfera total da Filosofia divide-se, no dizer do eminente professor Johannes Hessen, da Universidade de Colónia, em três partes (1987, p. 19): *teoria da Ciência, teoria dos valores e teoria da concepção do Universo* (4).

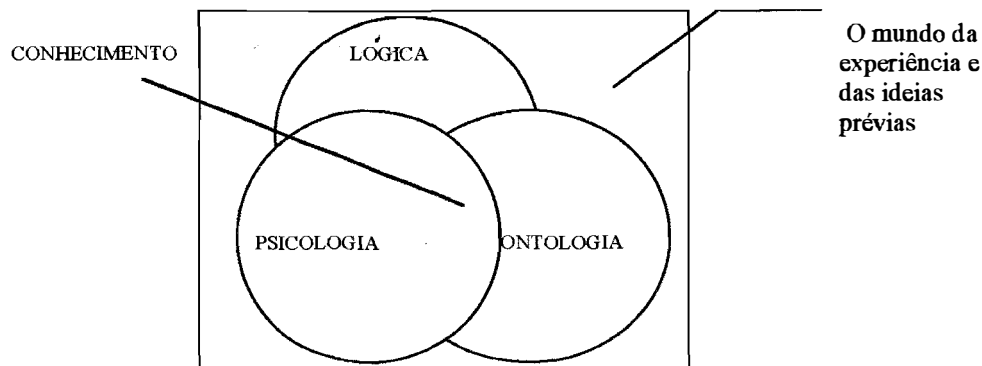
Esta última designação é muito vaga. Diríamos que uma teoria da concepção do Universo é também um objectivo da ciência, e em particular da ciência física, em cujo âmbito actualmente se destaca o famoso modelo do *big bang*. Que é este senão uma concepção do Universo? Mas o professor Hessen esclarece-nos quanto ao âmbito da concepção filosófica do Universo, ao subdividi-la na *metafísica* (que engloba uma metafísica *da Natureza* e uma metafísica *do espírito*) e numa *teoria* (também altamente metafísica) *do Universo* que investiga os problemas de Deus, da liberdade e da imortalidade. Por conseguinte, uma tal concepção do Universo está muito para além das cogitações que pretendemos efectuar neste trabalho.

Quanto à *teoria dos valores*, que engloba a *ética*, a *estética* e a *filosofia da religião*, também a deixamos de bom grado para os filósofos de carreira.

Resta-nos, pois, a *teoria da Ciência* e, mesmo esta, divide-se em duas partes: a *lógica* formal e a *teoria do conhecimento*. É sobre a **teoria do conhecimento**, e só sobre ela, que pretendemos centrar a nossa atenção. Não hesitaremos em recorrer, tanto quanto necessário, às informações de que dispomos provenientes da área científica das **Ciências e Tecnologias da cognição** (5).

É sobre o *conhecimento científico*, e, fundamentalmente, sobre o *alcance*, *origem*, *essência*, *metodologia* e *validade do conhecimento próprio das ciências físicas*, que nos iremos debruçar. Vamos partir do princípio de que o conhecimento físico existe, pois há razões históricas, psicológicas e epistemológicas para dele não duvidar. O progresso científico e tecnológico tem sido espectacular. Efectuam-se actualmente investigações sobre o cérebro humano (a década passada foi muito justamente chamada a década do cérebro). Espera-se, nos próximos tempos, enormes progressos no conhecimento do «*mais prodigioso quilograma de matéria que a Natureza produziu*». É possível já hoje colocar uma rede de neurónios artificiais a fazer a transferência da aprendizagem para uma situação nova, reconhecer uma letra ou um número, diferente daqueles que lhe foram ensinados. Perante estes factos, como poderemos duvidar da possibilidade do conhecimento humano? Nem faria sentido, do ponto de vista lógico, estar a discutir a existência ou não do conhecimento servindo-nos do conhecimento. Iremos questionar, isso sim, se existe determinada forma de conhecimento físico: *aquele que pretende atingir o conhecimento pleno da realidade exterior ao homem*.

Analisando em termos metacognitivos o processo do conhecimento científico, somos imediatamente forçados a concluir que ele envolve aspectos psicológicos, lógicos e ontológicos. Teremos, para não cair no psicologismo, no ontologismo ou no logicismo, de o encarar sob diversos ângulos, apelando para os conhecimentos e interacções dessas três esferas.



Os problemas gerais que iremos discutir têm que ver com toda a forma de conhecimento humano, e estão intimamente ligados entre si. Por segurança e por método, vamos abordar esses problemas separadamente e tanto quanto possível na perspectiva do conhecimento próprio das ciências físicas, mas, naturalmente, sem perder de vista uma visão geral dos problemas. A outros deixaremos de bom grado a tarefa de fazerem a transposição das ideias que aqui vão ser expostas para as áreas do conhecimento que melhor dominam.

Os macroproblemas que vamos debater são os seguintes:

1º-Problema da possibilidade do conhecimento físico pleno da realidade exterior:

Poderá o ser humano constituir-se como um sujeito cognoscente da autenticidade dos objectos que o rodeiam? A Física poderá atingir o conhecimento pleno de uma realidade exterior?

2º- Problema da origem do conhecimento físico:

Qual é a base ou origem do conhecimento físico do mundo: a razão ou a experiência? Qual é o papel das ideias e da experiência no conhecimento físico?

3º- *Problema da essência do conhecimento físico:*

Qual é o papel do ser humano no conhecimento físico? Conduz-se passiva ou activamente perante os objectos exteriores? Qual é o factor determinante no conhecimento físico: o sujeito ou o objecto? O conhecimento é descoberto ou construído?

4º - *Problema das formas, das motivações e da metodologia do conhecimento físico:*

Que formas assume o conhecimento físico? Podemos falar num método científico para o seu estabelecimento, em mais do que um método, ou nem faz sentido falar em método? Haverá mesmo um método experimental, que foi inventado por Galileu? O que é que motiva e influencia o conhecimento científico?

5º- *Problema da demarcação e do critério da validade do conhecimento físico:*

O que distingue Ciência e não-Ciência? O que é e o que não é o conhecimento físico? Qual ou quais os critérios que conferem validade ao conhecimento físico do mundo?

Acerca de cada problema, começaremos por analisar o pensamento histórico a respeito do mesmo. Só depois tomaremos e fundamentaremos a nossa posição, traduzindo-a, quando possível, através de um princípio acerca do conhecimento físico.

3.3. *O problema da possibilidade do conhecimento pleno da realidade exterior*

3.3.1 *Do dogmatismo dos primitivos gregos ao cepticismo nominalista*

Einstein considerava que *o que há de mais ininteligível no mundo é o facto de ele ser inteligível*. Esta frase traduz um acto de fé- a compreensibilidade do mundo, envolto num mistério: o porquê dessa compreensibilidade.

Essa fé na racionalidade do mundo e na capacidade da razão humana, que pensadores actuais, como Paul Feyerabend (6), põem em causa, remonta à antiga Grécia. Foi lá que surgiu a Filosofia, e, com ela, o início da crítica aos pressupostos irracionais do mito e à sabedoria popular desligada da razão e da evidência empírica. Os gregos iniciaram, de modo sistemático, a investigação racional acerca do mundo.

Pressupunham que os acontecimentos não são arbitrários, que cada objecto universal tem uma essência que vale a pena conhecer, e que todo o Universo é redutível, em última análise, a poucos elementos, princípios últimos do real, ou mesmo a um só.

As diversas *escolas gregas** reflectiam e discutiam qual ou quais seriam os princípios últimos, os substractos de todos os seres, a origem das suas transformações, o modo de os conhecer (7).

Com os gregos, as ideias de *necessidade* (as coisas acontecem quando e como têm de acontecer) e *ordem* (cosmos) sucederam às de *arbitrariedade* (as coisas acontecem arbitrariamente segundo a vontade dos deuses) e *desordem* (caos). Com o zénite do pensamento grego, o Universo passava, de irracional e contingente, a um Cosmos:

- onde reina a ordem e não o caos;
- onde cada corpo possui o seu lugar natural;
- em que a natureza de cada corpo determina o seu lugar no Universo e é a causa do seu comportamento;
- que revela uma estrutura dinâmica.

Os filósofos gregos mais antigos eram **dogmáticos** no sentido mais extremista, isto é, a sua confiança na razão humana era plena, pelo que o problema do conhecimento físico nem sequer se lhes colocava. Procuravam encontrar uma *ordem estática e perene no Universo*.

Outros gregos, ainda, defenderam que a ordem e inteligibilidade do real reside, não nos seus aspectos estáticos, mas no seu *dinamismo*, não na identidade dos seres, mas na sua *contradição interna*, na *luta dos contrários*. É o caso de **Heraclito** de Éfeso (século VI a.C.), o *pai da dialéctica*, de que falaremos posteriormente.

São os **sofistas*** os primeiros pensadores a aperceber-se de que não tinham apenas de se preocupar com o conhecimento do mundo, mas também com o metaconhecimento. São eles que problematizam pela primeira vez o próprio conhecimento e “*fazem com que o dogmatismo, em sentido restrito, resulte impossível para sempre dentro da Filosofia*” (Hessen, 1987, p. 39). Desconfiando do poder da razão para alcançar verdades universais, acabaram por cair no relativismo como forma de cepticismo.

O filósofo ateniense **Sócrates** (470-399 a.C.) interessou-se pelos problemas de ordem moral e política e não pelo mundo físico. Porém, ao contrário dos sofistas, acredita firmemente na capacidade da razão humana para encontrar verdades universais.

O fundador da Academia, **Platão** (428-348 a.C.) desvalorizou a experiência vivida no mundo sensível como origem do conhecimento, acreditando apenas no poder das Ideias, como traduzindo a realidade de um mundo inteligível. A Matemática, disciplina a que na Academia atribuiu grande importância, constituía, para ele, uma propedêutica disciplinadora do espírito, preparando este para o conhecimento intuitivo ou contemplativo do mundo.

Ao contrário de Platão, para **Aristóteles** de Estagira (384-322 a.C.) as percepções que temos do mundo sensível são fundamentais para o conhecimento. A razão constrói o conhecimento através da «purificação dos dados sensoriais». O conhecimento não é inato, como em Platão, mas adquirido.

O filósofo cristão **Santo Agostinho** (354-430), que era platónico, criou a primeira síntese entre o pensamento grego e a doutrina cristã. Considerando a razão e a fé como formas de conhecimento, subordinou a primeira à segunda e viria a influenciar grandemente todos os futuros pensadores não positivistas que passaram a utilizar Deus como garante da verdade acerca do conhecimento do mundo.

O teólogo mais representativo da escolástica cristã, **São Tomás de Aquino** (1224-1274) preocupou-se em separar o domínio da razão, ou domínio da Filosofia, do domínio da fé, ou domínio da Teologia, com uma intersecção onde cabiam questões como a da criação do mundo e a da imortalidade da alma.

Para São Tomás de Aquino, o conhecimento físico assenta na observação dos objectos individuais (as diversas flores, por exemplo), para, à maneira aristotélica, construir a definição geral dos seres. O entendimento tem a faculdade de, por abstracção, elaborar conceitos, que são entes ideais, a partir das percepções.

As grandes sínteses filosófico-cristãs, o agostinismo e o tomismo, começaram a ser postas em causa no século XIV pelos **filósofos nominalistas** e, particularmente, por **Guilherme de Ockham** (1285-1350). O *nominalismo* é a teoria segundo a qual os conceitos universais não existem, não têm qualquer realidade, não passam de signos linguísticos que designam conjuntos de seres da mesma espécie. Qualquer conceito, por exemplo, o de homem, tem uma existência mental, mas não extra-mental. Se o conceito é aplicável a todos os indivíduos da mesma espécie é porque as diferentes essências dos diversos indivíduos se assemelham, e não porque possuem a mesma essência. Não há a essência do homem, há as essências dos diversos homens. Só há indivíduos, realidades individuais.

O nominalismo contribuiu para fazer desabrochar um **cepticismo** acerca do conhecimento completo do mundo, por três motivos:

- porque considerava o *Universo contingente*, ao sabor das circunstâncias;

- porque admitia que as causas dos fenómenos só se podem determinar fielmente pela *observação* dos mesmos;
- porque, segundo ele, *o conhecimento do mundo físico baseava-se no singular, no individual* (Cordon e Martinez, 1987, 1º volume, p. 141).

Se o Universo é contingente, o seu conhecimento racional a partir de princípios gerais não tem sentido, pois esses princípios gerais não existem. Os gregos acreditavam na existência desses princípios racionais porque consideravam um Universo com uma ordem dinâmica, não evoluindo ao sabor do acaso.

O cepticismo de Guilherme de Ockam e outros filósofos relativamente ao poder da razão humana explica o seu esforço em separar absolutamente os domínios da fé e da razão. Esta última era considerada absolutamente incapaz de conhecer Deus e os atributos divinos. Deste modo, o nominalismo pode considerar-se precursor do positivismo.

3.3.2 A autonomia da razão

A partir do século XIII, recrudescer a confrontação entre a concepção radicalmente cristã da cultura na Idade Média e a autonomia da razão. Com o surgimento do humanismo renascentista e o desenvolvimento da chamada Ciência Moderna, os sistemas filosóficos medievais, baseados no pensamento aristotélico (8), começam a arruinar-se. De uma cultura medieval, essencialmente teocêntrica, passa-se, lenta mas decididamente, a uma cultura humanista, de carácter antropocêntrico e naturalista. O início do desenvolvimento de uma nova Ciência, com Copérnico, Kepler, Galileu, Descartes, Newton, Leibnitz, etc., contribuiu muito para isso (9).

O despertar do mundo para a nova Ciência, a que para sempre ficará ligado o nome de Galileu Galilei, contribuiu de modo decisivo para *aumentar o cepticismo relativamente à possibilidade de conhecer metafisicamente o mundo físico* e fez despertar, lenta mas seguramente, uma *visão cada vez mais positivista* desse

conhecimento (10). Novas ideias acerca do Universo se foram impondo (11). Estas ideias acabaram por culminar na genial síntese newtoniana, que rompeu definitivamente com o dualismo grego de *mundo celeste* e *mundo terrestre*, e construiu uma Física capaz de explicar muitos dos fenómenos observados.

Newton tinha plena consciência das limitações do seu conhecimento físico do mundo e da permanência de elementos metafísicos tais como a acção à distância e, bem assim, o espaço e o tempo absolutos. Mas, com os seus *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, que Lagrange considerou “*a produção máxima do espírito humano*” (Schurmann, 1946, 1º volume, p. 254), iniciou-se um período de triunfos consecutivos da ciência que se prolongou até aos finais do século passado.

Já ninguém se revelava céptico acerca do progresso do conhecimento do mundo físico, mas punha-se em causa a possibilidade de o poder vir a conhecer com rigor e verdade.

Uma das maiores autoridades em Física no século passado foi, sem dúvida, Lord Kelvin. Um dia declarou que a Física lhe parecia um conjunto harmonioso e, no essencial acabado. Apenas vislumbrava, no seu horizonte, “*duas pequenas núvens negras*”: o resultado negativo da experiência de Michelson e Morley e a catástrofe ultravioleta da lei Rayleigh-Jeans (Silva e Lochak, 1988, p. 16). Elas viriam a estar na base da maior revolução paradigmática ocorrida até hoje na Física, com a construção da *teoria da relatividade* e da *teoria quântica*.

3.3.3 *Que conhecemos: a realidade ou simples ideias?*

A Filosofia da Natureza pré-cartesiana não tinha conseguido construir um conhecimento sólido, porque todos os seus princípios provinham de uma certa perspectiva filosófica geral, muitas vezes confusa, incerta e duvidosa. Os sentidos, por sua vez, mostravam-se enganadores. À procura de ideias claras e distintas como base para o conhecimento certo, **Descartes** apenas encontrou dois apoios:

Deus e a Matemática. E construiu toda a sua metafísica “*tentando ligar estas duas certezas e apoiar uma na outra.*” (Koyré, 1986, p. 40).

Em lugar de uma Física aristotélica baseada nos sentidos, na nossa percepção sensorial, no senso comum, ligada às noções de qualidade e força, Descartes procurou encontrar uma Física ligada às noções de espaço e movimento, baseada em ideias claras, totalmente dedutiva, geometrizável, negando o poder do senso comum e da tradição. Em lugar de um Universo finito e ordenado hierarquicamente, com uma finalidade, onde cada ser tem o seu lugar natural correspondente à sua perfeição, cognoscível através de abstrações a partir dos sentidos, Descartes vislumbra um Universo infinito, onde todas as coisas e todos os lugares se equivalem, cuja estrutura não implica qualquer finalidade e não se explica por um fim, que é cognoscível apenas através de raciocínios dedutivos de inspiração matemática.

A Descartes não lhe interessam as qualidades subjectivas dos corpos (cheiro, cor, etc.), mas tão só as qualidades baseadas na extensão, porque essas se podem quantificar. Abdica, pois, das qualidades não quantificáveis, das formas e das forças míticas, das almas vegetativas e de toda a espécie de excrescências que infestavam a filosofia natural. Não há separação entre matéria e espaço, já que o Universo é pleno, não vazio.

Para Descartes a Matemática tem um valor universal, constituindo a própria estrutura da razão.

Mas, ao fim e ao cabo, em que resultou o sistema cartesiano do mundo?

Ao admitir um espaço pleno, em que forças actuando aparentemente à distância como as forças gravitacionais, e bem assim as magnéticas e as eléctricas, ficavam reduzidas à imaginária e não matemática teoria dos turbilhões, Descartes acabou por construir uma teoria de uma enorme complexidade, irreduzível à Matemática, que nunca ninguém entendeu. Esta fantasia dos turbilhões e a não incorporação das descobertas de Galileu no sistema cartesiano do mundo revela a deficiência do

sistema cartesiano que tinha a pretensão ingénua de traduzir racionalmente a realidade, a partir de ideias simples e evidentes. A teoria do movimento em turbilhão era tudo menos uma teoria redutível a ideias simples e evidentes.

Ao contrário do racionalista Descartes (a que voltaremos a propósito do racionalismo), que ambicionava o conhecimento absolutamente certo da Natureza, o empirista **Locke** afirmava que o conhecimento proporcionado pelas ciências da Natureza é apenas provável, por vezes tão provável que se poderia considerar certo (Leroy, 1985, p. 42). Pensava ele que, ao olharmos para um corpo, uma rosa por exemplo, só conhecemos propriedades como a forma das pétalas, o volume do caule, etc., e nem sequer conhecemos a verdadeira cor e o autêntico cheiro dela porque estas qualidades (ditas *qualidades secundárias*) não são propriedades da rosa. Não conhecemos, pois, a rosa como ser que é, mas tal como ela se revela ao nosso conhecimento.

Esta impossibilidade de conhecer as propriedades secundárias dos objectos já era considerada pelos filósofos gregos e também Galileu e Descartes a aceitavam. Mas enquanto os racionalistas como Descartes viram nesse facto apenas mais um motivo para duvidar do poder dos sentidos e se agarrarem à razão como fonte de verdade, os empiristas como Locke consideravam esse facto como uma limitação ao conhecimento do mundo real.

Em suma: *para Locke há uma realidade diferente das nossas ideias acerca dela, mas nós não conhecemos essa realidade.* As nossas ideias acerca dessa realidade são como que imagens aproximadas dessa realidade.

Este pensamento de Locke levantava o seguinte problema metafísico: *se apenas se conhecem ideias acerca da realidade exterior e não se conhece, de facto, essa realidade, como garantir que tais ideias são representações dessa realidade?* Com que direito Locke podia afirmar que as ideias científicas acerca da Natureza, que reconhecia serem meras imagens, eram de facto representações de seres naturais autónomos?

Que valor filosófico tem a afirmação de que existe uma matéria que não se conhece?

Como podemos dizer que a matéria da Lua existe se essa matéria permanece desconhecida para a nossa mente?

Era o idealismo à beira de resvalar para um **imaterialismo**. E esse resvalamento aconteceu, conforme veremos a propósito do idealismo, com **Berkeley**. Este filósofo, que Politzer considera *o pai do idealismo* (1975, p. 44), negava mesmo a existência da própria matéria. Para ele e para todos os adeptos do *idealismo imaterialista*, *imaterialismo* ou *acosmismo* “*o ser das coisas consiste apenas em serem percebidas e nada mais*”. Quer dizer: as ideias que temos da Lua, do Sol, das flores, etc., não são representações de qualquer realidade exterior a essas ideias. Esta forma de idealismo *nega pura e simplesmente a existência da matéria, enquanto tal!*

Este idealismo surgiu, segundo crêem materialistas dialécticos como Politzer, “*para combater as explicações científicas, materialistas e ateias*” (Politzer, 1975, p. 44). (12).

É importante clarificar que Berkeley não negava a existência da Lua, do Sol, ou dos restantes objectos de que possuímos percepção sensível. O que afirmava é que qualquer objecto não é mais do que o conjunto das sensações que nós temos acerca dele.

O empirismo inglês do século XVIII acabou por fortalecer um cepticismo acerca do conhecimento de uma realidade autónoma do sujeito cognoscente. De facto, para David **Hume**, talvez o representante máximo dessa escola, os elementos do conhecimento são:

- as *impressões* - recolhidas dos objectos por percepção sensorial;
- as *ideias* - representações ou cópias das impressões no pensamento.

Para sabermos se uma qualquer ideia é verdadeira (por exemplo, a ideia de que as leis da Física são as mesmas em dois referenciais que se movem com velocidade constante um em relação ao outro), só há um processo: comprovemos se tal ideia procede de alguma impressão. Realizámos experiências que nos permitiram perceber que assim é? Podemos identificar a impressão sensorial que nos conduziu a essa afirmação? Então estamos perante uma ideia verdadeira. Caso contrário estamos perante uma ficção.

Trata-se, portanto, de um **cepticismo acerca da possibilidade de conhecer qualquer realidade exterior autónoma do sujeito cognoscente**, uma vez que as sensações estão no sujeito.

Vários pensadores do século passado e do nosso adoptaram uma filosofia inspirada em Hume, segundo a qual é impossível distinguir-se entre os objectos e as sensações que deles provêm. Podemos talvez afirmar que a visão positivista da ciência no século passado, e a visão neopositivista da ciência já no nosso século, têm raízes em Hume.

3.3.4 O *criticismo kantiano*

É o grande filósofo do século XVIII, Immanuel **Kant**, que elabora pela primeira vez uma síntese dialéctica do cepticismo lógico e do dogmatismo, filosofias que, até então, sempre foram consideradas irreconciliáveis face ao problema da possibilidade do conhecimento da Natureza (13). Essa síntese é o *criticismo* (Hessen, 1987, pp 54 a 57).

De um modo muito resumido, poderemos dizer que Kant distinguia na Natureza o objecto, aquilo que aparece e pode ser conhecido - a que chamava *fenómeno*, e o correlato do objecto, aquilo que não aparece, e a que chamava *coisa em si* ou *númeno*. E considerava possível o conhecimento do fenómeno mas não o do númeno, conforme se depreende desta transcrição da sua maior obra de filosofia da Natureza - a *Crítica da Razão Pura*:

"Mesmo que pudessemos elevar esta nossa intuição ao mais alto grau de clareza, nem por isso nos aproximaríamos mais da natureza dos objectos em si. Porque, de qualquer modo, só conheceríamos perfeitamente o nosso modo de intuição, ou seja a nossa sensibilidade, e esta, sempre submetida às condições do espaço e do tempo, originariamente inerentes ao sujeito; nem o mais claro conhecimento dos fenómenos, único que nos é dado, nos proporcionaria o conhecimento do que os objectos podem ser em si mesmos" (1994, p. 79). (14)

3.3.5 A Física do século XIX e o conhecimento positivo

A Física newtoniana tem por alicerce uma visão mecanicista da Natureza de inspiração cartesiana (15).

O triunfo da Mecânica newtoniana veio fortalecer a crença na possibilidade de reduzir todos os fenómenos físicos a processos mecânicos. É a época dos fluidos etéreos para explicar a luz, o calor, etc.

Este mecanicismo está patente nos trabalhos de grandes cientistas do século passado. O próprio trabalho de Maxwell, que, ao estabelecer as equações matemáticas que definem o campo magnético, abriu a porta para o fim do mecanicismo, está impregnado de um espírito e uma forma mecanicista. São dele as seguintes palavras:

“ Quando um fenómeno físico se pode descrever completamente com uma mudança na forma e movimento de um sistema material, diz-se que o fenómeno tem uma explicação dinâmica completa. Nem podemos pensar que seja necessária ou desejável ou possível outra explicação ulterior” (in Scientific Papers, II, Cambridge, citação de Alquié et al., 1987).

Até à segunda metade do século passado podemos afirmar que a Mecânica newtoniana conheceu um caminho triunfal, parecendo vir a transformar-se numa estrutura científica praticamente acabada e definitiva (16).

Mas entretanto, a ideia de energia tinha-se imposto. O princípio da sua conservação revelava-se fundamental. Mas ninguém sabia verdadeiramente o que ela é.

A tentativa de estender a interpretação mecânica aos fenómenos biológicos originou uma acesa polémica entre os *mecanicistas* que continuavam a procurar reduzir tudo a fenómenos mecânicos e os *energetistas* que tentavam explicar todos os fenómenos, mormente os biológicos, na base da energia. Esta polémica persistiu até aos anos 30 deste século e chegou ao ponto de criar em materialistas radicais a ideia de que o homem não é mais do que uma máquina, e todos os fenómenos humanos, incluindo os psíquicos e mentais, são explicáveis em termos mecânicos.

Entretanto, com inspiração nas filosofias empiristas e indutivistas, ia-se fortalecendo uma visão positivista ou factual da ciência, renitente à especulação filosófica e que pretendia fazer do conhecimento científico um modelo do conhecimento filosófico. Só os dados dos sentidos e os conceitos a eles redutíveis são significativos em termos de conhecimento. O positivismo engloba uma série de filosofias mais ou menos empiristas, mas é, acima de tudo, uma atitude anti-metafísica face ao conhecimento (17).

Os positivistas consideram os dados, obtidos mais ou menos empiricamente, como objectos fundamentais do conhecimento. Esta posição positivista contribuiu para demarcar a Ciência da Filosofia. E porquê? O cientista passava a ter um fundamento epistemológico para analisar os dados científicos da sua especialidade e fugir intencionalmente a qualquer debate filosófico. O filósofo, eternamente preocupado com a validade do conhecimento, continuava a ter problemas para discutir, tais como:

O que são os dados científicos? Que valor possuem? Qual é o objectivo do conhecimento positivo? Etc., etc.

O **positivismo**, como modo «cómodo» de encarar o conhecimento, tem as seguintes *características essenciais*:

- a «essência» do mundo físico fica reduzida aos fenómenos sensíveis e a realidade é apenas o que se revela efectivamente através da experiência (fenomenismo);
- os objectos reais são apenas os objectos concretos e singulares e não os conceitos universais; estes são apenas nomes que designam conjuntos de seres da mesma espécie (nominalismo);
- o conhecimento geral tem o mesmo método que o conhecimento científico (este é modelar).(18).

3.3.6 As grandes críticas de Mach e Poincaré à Física newtoniana

O físico positivista austríaco Ernst **Mach** (1838-1916) fez uma crítica exaustiva da Física newtoniana, concluindo que ela estava impregnada de elementos extra-sensoriais e apriorísticos que só serviam para lhe tirar clareza. Eram exemplos o espaço e o tempo absolutos, que Kant considerava dados *a priori* provenientes de uma intuição pura, para não falarmos nesse *fluido fantasma* chamado éter.

Mach considerava que, caso não existissem percepções sensoriais, não existiria Física e esforçou-se por suprimir todos os elementos *a priori* na interpretação do conhecimento. Segundo o **empiriocriticismo** de Mach, a ciência deve limitar-se a traduzir factos, produtos das nossas sensações recolhidas do mundo exterior, e abster-se de toda a especulação teórica não fundada em sensações. Esta posição levou-o a não aceitar a existência dos próprios átomos, que, por essa altura, não passavam de hipóteses.

A distinção kantiana entre *fenómeno* e *coisa em si* não tinha para Mach qualquer sentido. As coisas reduzem-se a complexos de sensações não existindo para além delas. Assim, numa das suas obras, Mach escreve o seguinte: “*O mundo consiste de cores, sons, temperaturas, pressões, espaços, tempos, etc. A fixação do fluxo destes elementos... é o objecto real da pesquisa científica... Que o mundo é a nossa sensação....não pode ser posto em questão*” (cit. de Bradley, 1991, p. 35).

O princípio da causalidade, para os racionalistas uma afirmação meramente lógica e apriorística, passou a ser uma afirmação que, como qualquer outra, carece de verificação. Foi o que fez Einstein, logo que acabou de mostrar que o intervalo de tempo entre dois acontecimentos depende do referencial inercial onde é medido. Tratou logo de verificar que um acontecimento que pode ser causa de outro num referencial, também pode continuar a sê-lo noutro referencial.

O grande cientista francês Henry **Poincaré** (1854-1912), para além de ter produzido trabalhos no campo da Matemática ao mais alto nível, e ter dominado a Física a ponto de quase ter formulado a Teoria da Relatividade Restrita, ainda teve tempo para se dedicar à Filosofia da Ciência e produzir trabalhos notáveis também nesse campo.

Criticando o espaço da Geometria e chegando à conclusão de que ele não nos é imposto pelos sentidos (o que os sentidos poderiam mostrar difere do espaço dos geómetras) e, depois de verificar que os grandes postulados da Geometria também não são um produto lógico (a Lógica admite outras geometrias não euclidianas), Poincaré conclui que esses **postulados da Geometria são convencionalmente adoptados**. Se fôssemos transportados para um mundo não euclidiano, adoptaríamos outros (Poincaré, 1970, p. 16).

Quanto aos **princípios da Mecânica**, ainda que directamente apoiados na experiência, eles também possuem o mesmo carácter dos postulados geométricos, isto é, são **convencionalmente adoptados**. E se estes princípios da Mecânica *"possuem uma generalidade e uma certeza que faltam às verdades experimentais de que procedem é porque, em última análise, se reduzem a uma simples convenção que temos o direito de fazer, porque estamos antecipadamente certos de que nenhuma experiência virá contradizê-la.*

Portanto, esta convenção não é absolutamente arbitrária; não nasce do nosso capricho; adoptámo-la porque certas experiências nos mostram que seria cómoda." (Poincaré, 1970, p. 151).

A posição de Poincaré é a de que tanto a lógica como a intuição são indispensáveis na criação do conhecimento científico. Através do raciocínio lógico garantimos o rigor e a coerência das demonstrações. À intuição está reservada a tarefa da invenção. O cientista é um criador de uma linguagem adequada para referenciar os factos e os fenómenos. (Poincaré, 1970, pp. 10 e 11). A partir dos dados, a Ciência cria definições convencionais e constrói estruturas conceptuais que, juntamente com essas definições, ordenam o conhecimento empírico. Convém escolher as convenções de modo que essas estruturas conceptuais sejam o mais simples possível.

Valorizando o papel das hipóteses em Ciência, Poincaré considera as teorias científicas frágeis e efémeras. Porém, *“não morrem inteiramente, pois de cada uma delas fica sempre alguma coisa. É esta alguma coisa que é preciso procurar isolar, porque é lá, e apenas lá, que reside a verdadeira realidade.”* (Poincaré, 1970, p. 16).

3.3.7 A Física do século XX e o movimento analítico

Os desenvolvimentos da Ciência já no nosso século provocaram profundas alterações no pensamento acerca da mesma.

Por um lado, a *Teoria da Relatividade* veio mostrar que o palco dos acontecimentos já não é aquele majestoso espaço absoluto newtoniano, onde os acontecimentos se vão desenrolando ao sabor de um tempo universal e independente dos corpos; os acontecimentos ocorrem num contínuo espaço-temporal quadridimensional, sujeito a novas propriedades de transformação que ferem o senso comum. Mas este facto nunca preocupou Einstein. Afinal não é a ciência *“uma criação da mente humana, com seus conceitos e leis livremente inventados”*? (Einstein e Infeld, 1966, p. 235)

Por outro lado, com a *Física Quântica*, a realidade passou a ser vista com outros olhos. A descontinuidade substituiu a continuidade. As leis individuais deixaram de ter significado e passaram a valer apenas as leis estatísticas, referentes a sistemas de muitas partículas.

Um só átomo de rádio de uma amostra em estudo tanto pode sofrer uma desintegração β ao fim de uns segundos como ao fim de dias. Só sabemos, **em média**, ao fim de quanto tempo cada átomo emitirá um electrão a partir de um neutrão do núcleo, e nunca se o átomo X ou o átomo Y emitirá tal electrão agora ou depois. Cada átomo emite o seu electrão de um modo que se revela perfeitamente aleatório e é aqui que a lei da causalidade parece falhar. Parece não haver causa alguma para um átomo emitir o seu electrão ao fim de um segundo ou ao fim de horas, para o emitir nesta direcção ou naquela. Será por incapacidade científica passageira que não podemos prever o comportamento individual de qualquer átomo, ou a Natureza é mesmo assim?

Os físicos da *Escola de Copenhaga** e seus seguidores estão convencidos que tal causa não existe. E estão convencidos disto pela simples razão de que, ao contrário do que pensava Kant, «o átomo em si» não existe. Já não se trata, como supunha esse grande pensador, de sermos incapazes de conhecer a matéria na sua essência, isto é, os «átomos em si», em que Kant acreditaria, se nessa altura o conceito de átomo estivesse construído como está hoje. Trata-se de negar a própria existência dos «átomos em si».

Se o «fantasma» da «coisa em si» existe e não se conhece, ou se não existe mesmo, é certamente uma questão interessante do ponto de vista filosófico, mas não se tem revelado limitativa do ponto de vista da construção do conhecimento científico. A confirmar esta afirmação está o enorme progresso científico deste meio século após o aparecimento do princípio de incerteza de Heisenberg: é ele que pontifica na Física Quântica, como o princípio da invariância da velocidade da luz pontifica na Teoria da Relatividade.

Inspirado na filosofia de Mach, e nos novos paradigmas da Física surgidos no início do nosso século, surgiu o **movimento analítico** desenvolvido através de três correntes filosóficas sucessivas:

1ª - O *atomismo lógico* de Bertrand Russel e Wittgenstein (este último filósofo considerado na primeira fase do seu pensamento, quando escreveu a obra «*Tratado lógico-filosófico*»).

2ª - O *neopositivismo lógico* ou *empirismo lógico*, a corrente do Círculo de Viena a que pertenceram cientistas e filósofos da Ciência como M. Schlick, O. Neurath, R. Carnap, etc.

3ª - A *Filosofia analítica*, impulsionada por Wittgenstein (na segunda fase, que corresponde à sua obra «*Investigações Filosóficas*») (Cordon e Martinez, 1987, p. 149).

Este moderno movimento da Filosofia da ciência, que se estendeu ao longo da maior parte do nosso século, dá, de um modo ou de outro, uma **grande importância à linguagem**, e todo ele tem uma **tendência claramente empirista**.

Começamos pelo **atomismo lógico** de Bertrand **Russell** (1872-1970). Segundo este pensador, o Universo consta de múltiplos componentes dissociáveis, e a melhor maneira de o conhecer consistirá em decompor os factos complexos até chegar aos seus elementos mais simples, os chamados «*factos atômicos*» (as relações mais simples entre objectos). Os factos têm, já em si, forma lógica, e a linguagem que retrata fielmente esses factos terá de ser manipulada através do raciocínio lógico, de modo a adaptar-se a eles (linguagem-retrato). Os factos elementares ou atômicos constam de elementos simples.

Russell abandonou a tese de Hegel segundo a qual as partes só se tornam compreensíveis pelas suas relações com o todo e integradas no todo. Continuou, porém, a considerar que há relações entre os elementos do mundo exterior que, como materialista convicto que era, considerava para além do corpo e da consciência. Segundo ele, essas relações devem ser analisadas com base nas regras da Lógica.

Os filósofos idealistas modernos, de inspiração hegeliana, criticam Russell pela sua análise, que consideram inaceitavelmente *reducionista* a factos isolados e também não aceitam o seu conceito de verdade desses factos (19).

Os aspectos considerados mais criticáveis no atomismo lógico de Russell são os seguintes:

- a análise lógica a que ele procede, por ser demasiado reducionista e atingir mesmo conclusões empiristas idênticas às de Hume, hoje inaceitáveis;
- o princípio, em que assenta, de que as estruturas da linguagem correspondem às estruturas da realidade (o próprio Wittgenstein acabou por aceitar que as proposições em que se baseia essa correspondência carecem de sentido);
- a classificação dos factos em complexos e simples, dada a relatividade de tal classificação (20).

O **neopositivismo lógico** ou **empirismo lógico** é a designação das ideias filosóficas do chamado *Círculo de Viena**, fundado por volta de 1922. Nesta data constituiu-se, em torno de Moritz Schlick, um grupo de cientistas e filósofos, entre os quais Rudolf Carnap, Herbert Feigl, Philipp Frank, Kurt Godel, Victor Kraft, Otto Neurath e Friedrich Waismann. O *Círculo de Viena* influnciou rapidamente o meio intelectual em outros locais, por exemplo em Berlim, onde então se encontrava Hans Reichenbach, e conheceu o seu esplendor ao longo do segundo quartel do nosso século com a aderência de muitos filósofos e cientistas que também perfilharam as *ideias mestras do neopositivismo*, a saber:

- a recusa da metafísica como sistema de conhecimentos;
- a restrição da actividade filosófica a uma análise crítica da linguagem e a uma procura do significado das proposições.

Com o neopositivismo, o problema da possibilidade e limites do conhecimento passou a ser substituído pelo problema da possibilidade e limites da nossa linguagem. Assim, por exemplo, **o problema do que podemos conhecer foi substituído pelo problema do que podemos afirmar de modo a que as afirmações tenham significado.**

Segundo o empirismo lógico, há dois tipos de afirmações, as *empíricas* e as *formais analíticas*.

As proposições *formais analíticas* não informam acerca dos factos universais; a sua verdade não depende dos factos; são simples tautologias; têm significado em si, pois são meramente lógicas; correspondem, de certo modo, às verdades de razão de Leibniz.

As proposições *empíricas*, pelo contrário, fornecem informações acerca dos factos; a sua verdade baseia-se nos factos, na comprovação empírica; só adquirem significado quando se conhece um critério para serem verificadas.

As afirmações metafísicas não têm qualquer sentido porque, por um lado, não são formais analíticas, pois não são afirmações lógicas nem têm significado em si mesmas, e, por outro lado, também não são empíricas, já que não há qualquer critério para a sua verificação.

Este *problema da verificação ou verificabilidade* do significado das proposições é o calcanhar de Aquiles do neopositivismo. Sobre esse problema debruçar-nos-emos na secção 3.15.

3.3.8 O operacionalismo, o construtivismo e a visão actual da Ciência

As ideias do Círculo de Viena têm várias fontes mas uma das principais foi a Teoria da Relatividade de Einstein (21). A Teoria da Relatividade influenciou também P. W. **Bridgman**, da Universidade de Harvard, que fundou o **operacionalismo**. O operacionalismo teve grande repercussão em Física, influenciando alguns importantes cursos desta ciência (Marquit, 1978, p. 784) e assenta nas seguintes ideias:

1ª - A carga eléctrica, a massa, o comprimento, a temperatura e as demais grandezas físicas são quantidades abstractas que não apreendemos intuitivamente, mas apenas operacionalmente. São, portanto, apenas definíveis operacionalmente, isto é, como resultado de certas operações.

Assim, por exemplo, o comprimento e a temperatura, como conceitos abstractos, não têm significado. O comprimento de uma régua ou a temperatura de um corpo, medidos em determinadas condições, já adquirem significado.

2ª - As leis físicas são relações entre grandezas definidas operacionalmente. Poderão incluir símbolos, como por exemplo o da função de onda, que não são definidos operacionalmente; mas é possível relacionar logicamente estes símbolos com grandezas definíveis operacionalmente.

3ª - O papel de uma teoria física é proporcionar, com base num número mínimo de hipóteses, um máximo de descrições de experiências possíveis.

4ª - A questão da «verdade última» das hipóteses, da sua «certeza apodítica» não tem sentido e apenas se coloca o problema do seu *valor funcional*.

5ª - As teorias e as respectivas hipóteses podem ser substituídas por outras que descrevam mais experiências ou as mesmas de um modo mais simples.

Com o positivismo lógico e o operacionalismo, a ambição dos sistemas filosóficos tradicionais de procurar o conhecimento absoluto e definitivamente verdadeiro «foi por água abaixo»...

De meados do século para cá surgiram as **filosofias construtivistas**, que, partindo do conhecimento como um processo dinâmico, e não como um facto consumado, reforçaram ainda mais o papel do sujeito cognoscente na construção do conhecimento, bem como a importância da Psicologia e da Sociologia nesse processo de construção.

Isto teve como consequência uma visão muito mais subjectiva, humanística e social da Ciência. Porém, sobre o construtivismo e os seus efeitos debruçar-nos-emos noutro local.

3.4. A ciência física não pode ter como objectivo legítimo o conhecimento pleno da realidade exterior - 1º Princípio

3.4.1 Nem cepticismo nem dogmatismo acerca do conhecimento do mundo físico

A Escola pitagórica* grega defendia que o Universo é cognoscível e que o seu conhecimento é proporcionado pela Matemática, porque ele próprio tem estrutura matemática. Quantas ideias científicas modernas não estão manifestamente de acordo com esta hipótese? Por exemplo: uma das coisas em que acreditamos é no campo electromagnético. Acreditamos nele porque as mais variadas experiências que a tecnologia moderna tem proporcionado confirmaram todas as previsões feitas com base nele. Mas...o que é conceptualmente o campo para além das equações que o definem?

O Universo revela-se hoje muito diferente daquilo que Aristóteles concebeu. Temos, porém, fortes razões para acreditar que a grande variedade de materiais do imenso Universo é constituída, não por 5 elementos, como pensava Aristóteles, mas por cerca de 100 elementos diferentes.

Com base na existência destes blocos que constituem toda a matéria e das forças que os unem, tornou-se possível descrever o modo como a matéria universal se comporta.

Essa descrição é muito diferente da descrição aristotélica, mas o estagirita influenciou de modo decisivo a história do pensamento acerca do mundo.

Heraclito defendia um **Universo dialéctico**, ideia esta que mais tarde foi retomada por Hegel (22). Num Universo dialéctico, todas as coisas estão universalmente inter-relacionadas num contínuo processo de mudança e desenvolvimento. As mudanças são uma consequência da interacção (dialéctica) entre tendências opostas. Alguns aspectos do que é antigo, a «nata» do conhecimento, vão permanecendo no que é novo. O mundo não é estático, nem evolui ciclicamente. A

sua evolução faz-se em espiral. Não vemos ainda hoje surgirem por todo o lado demonstrações de que as ideias dialécticas de Heraclito e Hegel têm algum fundamento?

Alguém disse que não há afirmação alguma na Ciência Moderna que não se assemelhe a outra que um filósofo grego produziu. Não diríamos tanto. Mas, do que não temos dúvidas, é que coube ao pensamento grego o ter desencadeado o debate de ideias. E quando há debate de ideias há produção de conhecimento. Assim se iniciou o desbravar do caminho para a grande cruzada, sempre inacabada, da construção do conhecimento, como esforço permanente para desvendar os mistérios do mundo e combater a ignorância e o mito. Depois desta já longa caminhada, após tantas e tantas barreiras transpostas, com a evidência dos enormes triunfos da ciência e da técnica, ainda haverá alguém que duvide da possibilidade do conhecimento físico?!

Pensamos que hoje em dia não se justifica o *cepticismo lógico, radical ou absoluto* manifestado por alguns filósofos, desde **Pirrón de Elis** (360-270), porque tal posição pressupõe a impossibilidade de se conhecer algo acerca do mundo em que vivemos.

Bem pelo contrário, cremos que a história da evolução das ideias físicas dá-nos sobejas razões para confiar na capacidade da razão e do engenho humano para conhecer cada vez mais profundamente o chamado mundo físico. Contra todas as profecias cépticas dos anos 20 e 30 do nosso século, a ciência respondeu com uma demonstração inequívoca do seu poder, ao progredir espectacularmente no conhecimento do mundo microscópico e do mundo macroscópico.

Consideramos, assim, que um dos grandes objectivos da Física é precisamente o conhecimento do mundo físico. Afirmar isto implica **acreditar na existência de um mundo físico, que, em parte, é exterior ao homem.**

O filósofo alemão do século passado Arthur **Schopenhauer** (1788-1860) observou um dia que "*meteríamos simplesmente no manicómio quem ousasse negar a existência do mundo exterior*" (Hessen, 1987, p. 140). De facto, parece-nos extravagante, hoje em dia, pretender negar a existência de um mundo exterior ao sujeito cognoscente, isto é, negar que a matéria é anterior à inteligência humana, quando há argumentos fortes para acreditar que esta inteligência surgiu muito recentemente na longa história do Universo, e é um produto da sua evolução.

Se não acreditássemos no mundo físico e na possibilidade de o conhecer, muito menos acreditaríamos na possibilidade de conhecer algo acerca desse conhecimento e, então, este trabalho de metaconhecimento não teria qualquer razão de existir.

Não somos, pois, **cépticos** no que toca ao conhecimento físico do mundo. Mas o facto de não sermos cépticos não significa que sejamos o oposto, isto é, **dogmáticos**. Tirando partido da história da evolução das ideias acerca do conhecimento do mundo físico, habituámo-nos a não confiar cegamente no poder do intelecto humano, a reconhecer a limitação da capacidade de percepção dos objectos, a verificar em nós próprios e nos outros a influência das preconcepções no funcionamento da mente.

Estamos consciente das limitações que se põem ao conhecimento do mundo físico em que acreditamos. Assumimos, assim, uma posição crítica intermédia entre o cepticismo e o dogmatismo, que vamos tentar fundamentar de modo necessariamente breve mas claro.

3.4.2 O criticismo moderno como resposta ao problema do conhecimento da realidade exterior

Já os filósofos antigos se habituaram a distinguir, com toda a clareza, a **essência** ou natureza de uma coisa e as suas **aparências**. Não é o mesmo falarmos da água que num dado momento bebemos, ou que obtivemos no laboratório após filtragem, ou em que deliciosamente mergulhámos num dia tórrido, ou falarmos da verdadeira,

da autêntica água, da matéria que é absolutamente água. Onde está esta? Se formos filosoficamente exigentes, diremos que em parte alguma ela se encontra. O que existe, **o que aparece**, são diversas misturas em que o principal componente é a água (algumas quase, quase puras...).

A água, como essência, não é real, não existe no mundo exterior, é um conceito, é uma ideia, é uma construção da mente humana. O conhecimento das diversas águas (da realidade em que acreditamos) e, em particular, daquelas que mais se aproximam da ideia que temos de água, passa pela construção desta ideia de água. Se este conceito estiver solidamente estabelecido, se tivermos um conhecimento absolutamente exacto e completo acerca das moléculas, dos átomos de hidrogénio e de oxigénio, dos nucleões e electrões que os compõem, etc., poderemos dizer que conhecemos a água, aquilo de que uma determinada realidade se aproxima mais ou menos. Mas será que temos uma construção acabada, definitiva, indiscutível, acerca dessas partículas? Sabemos exactamente o que é a molécula de água, o que é o átomo de oxigénio e o átomo de hidrogénio, os prótons que formam estes e os respectivos *quarks*? Julgamos que nem o físico mais dogmático se atreveria a responder que sim. Estamos longe de ter um conhecimento completo, acabado, acerca de tudo isto. Estamos conscientes de que o que sabemos hoje não é definitivamente igual ao que conheceremos amanhã acerca dos mesmos objectos. Sabemos também que, a nível do muito pequeno, a Mecânica Quântica impõe limites ao nosso conhecimento, porque o princípio da incerteza é inexorável: deste limite não se passa!

Não ser céptico nem dogmático é adoptar o **criticismo**, é ter a consciência de que se conhece alguma coisa, mas não tudo acerca do mundo físico. É reconhecer que, embora o progresso do conhecimento tenha sido enorme, este facto não garante que estejamos longe ou perto de conhecer tudo, e muito menos garante que algum dia venhamos a conhecer tudo. É aceitar que o conhecimento dos objectos é afectado pelo próprio processo do conhecimento, sendo, pois, mais ou menos polémico e discutível. É, acima de tudo, **ser crítico** em relação ao conhecimento actual, às suas fontes, aos seus processos de construção.

O **subjectivismo** e o **relativismo**, quando encarados como filosofias do conhecimento, *são formas de cepticismo mascarado* e também são de rejeitar como respostas ao problema da existência do conhecimento científico.

Ser um cientista subjectivista, tal como Hessen encara o subjectivismo (1987, pp. 46 a 50), é uma contradição. Um cientista não pode admitir que afirmações como «a velocidade da luz no vácuo não depende do referencial onde é medida», «os átomos existem», «o homem é formado por células», etc, sejam válidas para uns sujeitos cognoscentes e não o sejam para outros. Não está aqui em causa se elas fazem parte de sistemas conceptuais verdadeiros ou falsos, definitivos ou transitórios. O que sucede é que afirmações como estas são tão fundamentais do ponto de vista científico que a sua validade não pode ser encarada de modo arbitrário. Fazem parte da tal «nata» que se vai acumulando à medida que o conhecimento vai evoluindo.

O relativismo é uma espécie de cepticismo que faz depender a validade das afirmações cognitivas de factores externos ao sujeito cognoscente. O subjectivismo faz depender essa validade de factores que envolvem o sujeito. Ainda ouvimos afirmar algumas vezes que, de acordo com a Teoria da Relatividade de Einstein, toda a afirmação científica é relativa, no sentido de a sua validade depender do observador. Tal juízo não é correcto. Há várias afirmações científicas que a Teoria da Relatividade não faz depender do observador. Por exemplo: a afirmação da invariabilidade da luz no vácuo; as afirmações que traduzem a validade das leis de conservação; a afirmação de que um corpo tem uma massa própria; etc.

O **pragmatismo**, como cepticismo mascarado, também não é a resposta adequada ao problema da existência do conhecimento. Não estamos a ver nenhum matemático a defender que a afirmação «dois mais dois são quatro» é verdadeira só porque é útil; ou um físico a dizer que a afirmação «a água exerce num corpo nele mergulhado uma força vertical de baixo para cima de medida igual ao peso do volume de líquido deslocado» está correcta apenas porque é valiosa (não deixa afundar os barcos...).

O pragmatismo, ao condicionar a validade do conhecimento ao útil, ao valioso, ao fomentador da vida, ao fomentador do progresso, torna-se inaceitável.

Enfim, até por exclusão de partes, resta-nos o **criticismo**. Não o criticismo de Kant, obviamente, mas o criticismo de hoje, com toda a repercussão nele da evolução científica entretanto ocorrida.

Tal como diz Hessen, *"ao designar o criticismo como a única posição justa, pensamos no criticismo geral, e não na forma especial que ele encontrou em Kant. Admitir o criticismo geral não significa outra coisa, em conclusão, que não seja reconhecer a teoria do conhecimento como uma disciplina filosófica independente e fundamental"* (1987, p. 56).

3.4.3 Alguns aspectos importantes do criticismo

Convém aqui realçar, para que não subsistam dúvidas acerca da nossa posição, alguns aspectos importantes do criticismo que assumimos:

O primeiro aspecto tem a ver com a validade desta mesma posição. Demonstrámos que o conhecimento existe? Deduzimos logicamente que o conhecimento pleno da realidade exterior é impossível? Francamente assumimos que não. Repetimos que não é através da lógica, não é por um raciocínio hipotético-dedutivo que fundamentamos a existência ou a não-existência do conhecimento pleno e definitivo. Concluir acerca da realidade ou não do conhecimento servindo-nos dele próprio seria ilógico, como já afirmámos.

Que o conhecimento é possível, ainda que o conhecimento pleno da realidade exterior o não seja, é apenas um **princípio**, um **postulado**, e nada mais. Propomos este princípio com base numa visão crítica do enorme progresso científico e técnico que ocorreu ao longo da história, principalmente no nosso século.

A existência e o valor do conhecimento sempre incompleto do mundo físico é um pressuposto que assumimos por intuição, fé e devoção àqueles grandes pensadores que, ao longo dos séculos, rejeitaram e ainda rejeitam quer o dogmatismo quer o cepticismo radical e, bem assim, todas as formas mais ou menos disfarçadas de cepticismo, acreditando no poder, mas também nas limitações, do entendimento humano. Com eles, **acreditamos que é possível penetrarmos cada vez mais profundamente nos segredos do mundo físico, sem porém conseguirmos «desnudar» completamente esse mundo.**

O segundo aspecto diz respeito ao facto de o *criticismo* não ser apenas uma posição filosófica. É *uma autêntica atitude metodológica* preconizada para o pensamento científico poder atingir o conhecimento da realidade, tal como atrás a definimos. Passa por uma atitude de crítica permanente ao conhecimento que vamos construindo, às fontes de que nos servimos para o construir, aos argumentos a favor e contra que se nos deparam, etc.

O terceiro aspecto prende-se com o facto de o *criticismo* também se assumir como tal no que se refere ao problema do que é a realidade, levantado pela Física Moderna.

Kant sustentava que a verdadeira essência das coisas, as «coisas em si», existem mas não são inteligíveis. Esta convicção não abalou a sua crença no poder do entendimento humano. Apenas o obrigou a uma atitude de crítica permanente da mesma, e a uma filosofia que se poderá, com toda a propriedade, apelar de *criticismo*. A história deu-lhe razão ao revelar, de modo inequívoco, que a ciência não deixou de progredir - felizmente! - porque a verdadeira essência das coisas lhe é inacessível.

A Mecânica Quântica, na medida em que considere ser uma teoria completa, põe em causa a vinculação e ordenação das percepções segundo o modelo kantiano da «coisa em si».

Se essa Mecânica for de facto completa, como afirmam os defensores da Escola de Copenhaga, estaremos, não só perante o primeiro exemplo histórico de uma teoria científica completa, acabada, fechada, como, também, perante a necessidade de abdicarmos definitivamente da crença na existência de um mundo objectivo exterior, de um mundo que existe para além das percepções. Não só não o podemos conhecer na sua plenitude, e isso já o aceitávamos, *como ele nem sequer existe*. É o próprio conhecimento a dizer que uma coisa que não se conhece verdadeiramente, na sua essência, não existe...

Com efeito, a matéria é feita de átomos e, segundo a interpretação ortodoxa da Mecânica Quântica (a da Escola de Copenhaga), não há, pura e simplesmente, o átomo em si (Heisenberg, p. 171).

A realidade passa a ser criada por cada observador no momento de proceder à observação. A Natureza deixa de ter, só por si, uma existência real. Passa a *"existir como uma multiplicidade de potencialidades de realização. É a medida, a observação, que poderá eventualmente tornar real um daqueles estados potenciais."* (Croca, 1990, p. 64). *A realidade deixa de ser aquilo que é para passar a ser aquilo que se observa e mede*. É um mundo de «mundos paralelos virtuais», cada um se transformando em real quando abalroado pela observação.

Uma coisa é certa: seja o que for a realidade do mundo físico, objecto do conhecimento humano, o importante é que essa realidade existe. A Física não tem a pretensão de conhecer verdades absolutas e eternas acerca dos fenómenos que ocorrem nesse mundo físico. Mas trata-se de conhecer uma realidade. Esta *realidade cognoscível* já há muito deixou de ser o mundo das «coisas em si». A realidade epistemológica é o que conhecemos, tal como o conhecemos, e nada mais. O electrão é aquilo que conhecemos como electrão e não outra coisa. O átomo é **aquilo que hoje sabemos** acerca do átomo, e não outra coisa. Mas falta precisar a afirmação «aquilo que hoje sabemos». Há que questionar a validade daquilo que hoje sabemos». Isso será feito mais adiante.

Actualmente já se conseguiram fotografar átomos. São imagens da realidade dos átomos em que acreditamos. Se são «átomos em si» ou não são «átomos em si» não é muito importante do ponto de vista da Ciência. O que é importante é que há «objectos» que foram fotografados, e a que chamamos átomos, e dos quais temos um determinado conhecimento. Consideramos esse conhecimento limitado e tudo aponta para que jamais conheçamos completamente um átomo, mas é apaixonante pensar que há a possibilidade de conhecê-lo cada vez melhor. Tal como todas as outras fotografias, as dos átomos são apenas imagens, não são a realidade. Mas as nossas ideias acerca dos objectos macroscópicos também não são, afinal, mais do que isso. São imagens obtidas com a máquina fotográfica da mente, ou com os «olhos da mente», para aplicarmos uma expressão em voga. Esses «olhos», ao mesmo tempo que deformam a realidade exterior, constroem eles próprios outra realidade chamada **Ciência**. Esta realidade é uma síntese construída pelo conhecimento humano a partir de observações diversas dos objectos, *mas "sob olhares descontínuos e, portanto, imperfeitos"*.

O conhecimento da realidade em si não é um objectivo da Ciência. A Ciência, com o intuito louvável de ser rigorosa, recorre à *medição*. Temos plena consciência de que o acto de medir *altera necessariamente o objecto a medir*. Mas este facto irremediável não nos preocupa. Tal como afirma Hamburger, "*a aventura do conhecimento científico é suficientemente grandiosa para não ter de temer esta constatação hoje evidente: a exploração científica do mundo não tem limites, mas também não tem esperança de atingir uma realidade independente do observador, dos seus métodos e da sua escala de observação*" (Thom et al., 1988, p. 10). (23).

3.5. O problema da origem do conhecimento físico

3.5.1 Empirismo versus racionalismo

Consideremos uma afirmação fundamental da Ciência do mundo físico, por exemplo esta: «*num sistema isolado, a energia mantém-se constante*». Esta afirmação, que traduz o *princípio da conservação da energia*, tem uma história. Ocorreu um processo através do qual o significado atribuído à palavra energia evoluiu de tal modo que foi possível estabelecer tal afirmação. Essa história é hoje bem conhecida. Sabe-se que essa história envolveu, por um lado, *experiências*: as experiências de Joule sobre o equivalente mecânico do calor, as experiências de Rumford que permitiram abolir a ideia de calórico, etc., etc. Mas, por outro lado, sabemos que o estabelecimento desse princípio também foi obra do *pensamento*: a reflexão de Julius Mayer a bordo do navio holandês Java, onde, no dizer do historiador Paul Schurmann, "*nasceu a ideia do princípio da conservação da energia*" (1946, 2º vol, p. 270), o pensamento de Joule que conduziu à concepção das suas experiências, a reflexão de Carnot sobre a máquina a vapor, etc., etc.

Se passarmos em revista muitas outras afirmações consideradas correctas pela comunidade científica, veremos que em todas elas está intrínseca uma relação experiência-pensamento. Na construção da ciência intervêm, por um lado, actos perceptivos, que envolvem os sentidos, e por outro, o pensamento, a formação das ideias, actos em que intervém a razão (24). A questão que agora vamos discutir é esta: qual é decisivo, qual é originário, no processo do conhecimento físico: a experiência ou a razão? É a experiência que proporciona o pensamento, as ideias, acerca dos objectos físicos, ou é através do pensamento puro, das ideias «não corrompidas» pela experiência, que chegamos ao conhecimento, servindo então a experiência apenas para confirmar ou infirmar essas ideias?

Este problema ainda hoje levanta muita discussão e polémica, conforme podemos verificar na obra «*A Filosofia das Ciências Hoje*» (Thom et al., 1988, pp. 13-58). Essa obra revela-nos um debate muito vivo, mesmo mordaz, entre um matemático francês, **René Thom**, que se celebrou pela teoria das catástrofes, que tem uma posição claramente racionalista, quase diria visceralmente anti-empirista, e um físico, **Anatole Abragam**, que assume uma posição muito crítica a respeito da posição de Thom.

Antes de assumirmos uma posição clara a respeito deste problema da origem do conhecimento, vamos ver o que nos ensina a história da Ciência e da Filosofia.

A *tese* e a *antítese* que a história nos revela acerca deste problema são o *empirismo* e o *racionalismo*. Os *empiristas* vêem na experiência a única fonte do conhecimento humano. O espírito humano para os empiristas é um espírito «tábua rasa». É como uma folha em branco, onde as percepções sensoriais vão escrevendo os dados a partir dos quais a mente constrói os conceitos. Estes, desde os mais gerais e abstractos até aos mais particulares e concretos, procedem da experiência e nada acrescentam a ela. Ao contrário, os *racionalistas* (de *ratio* = razão) vêem na razão, no pensamento, a fonte originária do conhecimento humano. O conhecimento só o é, de facto, quando a razão o considera logicamente necessário e universalmente válido.

3.5.2 Breve história do racionalismo

1. O racionalismo transcendental platónico e o racionalismo teológico

As raízes do racionalismo repousam nos grandes matemáticos que formaram a *Escola pitagórica*. Para eles, os seres do Universo, tanto o que são como o seu comportamento, são formuláveis matematicamente. Identificando realidade e número, os pitagóricos têm da Matemática uma concepção algo mágica. Os números são seres dotados de poder, intervêm no comportamento físico e humano.

Esta ideia influenciou aquele que é considerado (Hessen, 1987, p. 63) o primeiro grande filósofo racionalista da história: **Platão**. O seu **racionalismo** é **transcendental**, sendo a alma o princípio do conhecimento intelectual. As Ideias platônicas (a justiça em si, a bondade em si, o homem em si, as diversas entidades em si) eram, para ele, reais, supra-sensíveis e, como tal, não acessíveis através dos sentidos. Estes não podem captar as estruturas matemáticas, essas essências inteligíveis que formam o Universo físico. São, pois, incapazes de conduzir a um saber autêntico.

Aristóteles não era um filósofo racionalista. Também não se pode considerar um empirista. A sua posição epistemológica perante o problema da origem do conhecimento será explicada posteriormente.

O racionalismo transcendental platónico esteve na base do **racionalismo teológico** de **Santo Agostinho**. Este pensador não se limitava à razão e apelava também para a fé como fonte de conhecimento, sem se preocupar em traçar fronteiras claras entre uma e outra.

Com ele, as Ideias platônicas passaram a ser ideias provenientes do Deus criador. O espírito humano conhece a verdade por «iluminação divina», ao contemplar e adorar a sua obra criadora. Este racionalismo teológico foi mais tarde assumido por **Malebranche**, no século XVII, e por **Gioberti**, no século XIX (Hessen, 1987, pp. 64 e 65).

2. O racionalismo inatista

O maior filósofo racionalista da Idade Moderna é **Descartes**. Com ele, inaugura-se uma nova época da Filosofia. Seguem-se-lhe, na mesma linha, Leibniz e Espinoza. Com a célebre imagem da árvore (25), Descartes procura traduzir a ideia da *estrutura unitária e integradora das diversas ciências*. Embora com ramos diferentes, a que correspondem objectos diversos, o conhecimento é, para Descartes, uno e idêntico quaisquer que sejam os objectos a que ele se refere.

A sabedoria humana tem uma estrutura unitária, uma ordem conceptual, porque assenta na razão humana que é única. A *razão* que distingue o verdadeiro do falso, que destrinça o que convém do que não convém, que se aplica ao conhecimento teórico e ao prático, *é uma só*. A metodologia do conhecimento científico também é uma só, pois destina-se a orientar a mente para que esta atinja o conhecimento certo, indubitável, ou, se preferirmos, absolutamente verdadeiro.

O conhecido *método analítico-sintético cartesiano* será referido posteriormente. Por ora diremos apenas que se trata de um método racional, inspirado na Matemática. Tal como a demonstração matemática, o método cartesiano recorre à análise que conduz às verdades intuitivas e simples, e à síntese dedutiva das verdades complexas.

Como exemplos de verdades intuitivas e simples, Descartes refere a consciência de nós próprios como seres pensantes, a consciência de que o triângulo tem três lados, etc.

É a partir dessas evidências intuitivas e simples que Descartes, por encadeamento lógico, pretende deduzir a verdade acerca dos conhecimentos mais complexos.

Para Descartes são, portanto, fundamentais as ideias intuitivas (26). São como que alicerces que, a não serem verdadeiros, falsearão todo o processo cognitivo. Os sentidos e a imaginação são considerados enganadores. Logo, só a *razão* garante a veracidade desses princípios intuitivos. Trata-se de ideias naturais ou inatas porque são produzidas espontaneamente pela mente, independentemente de qualquer experiência ou imaginação.

Em resumo, o racionalismo cartesiano é um **racionalismo inatista** porque:

- o conhecimento da realidade pode deduzir-se a partir de ideias-base evidentes;
- estas ideias-base são inatas, existem na mente à margem de qualquer experiência sensível.

E foi, assim, que Descartes procurou banir toda a gama de ideias obscuras que infestavam a Física do seu tempo, tais como ímpetos, potências vitais, almas vegetativas, etc. Em sua opinião, estas ideias eram obscuras porque foram abstraídas a partir dos sentidos e não deduzidas a partir de ideias inatas, claras e simples. *Só é claro aquilo que a inteligência concebe de forma pura*, isto é, sem nenhuma intervenção da imaginação e dos sentidos. Transcrito em termos racionalistas modernos, poder-se-á interpretar esta frase como significando: *só é claro o que for matematizável*.

O cerne do pensamento metafísico cartesiano, ponto de partida para a pretensa compreensão racional de todo o Universo, está neste encadeamento:

- eu penso, posso pensar bem ou mal, mas se penso é porque existo - «*cogito ergo sum*»;
- existo como ser pensante, tenho dúvidas, afirmo e nego: tenho consciência da minha imperfeição; sou imperfeito e finito;
- mas, se tenho consciência que sou imperfeito e finito, é porque possuo um referente, tenho em mim mesmo uma ideia de um ser perfeito, infinito, a que chamo Deus;
- Se Deus é perfeito, não é enganador: Ele garante a verdade do meu pensamento.

Terminamos esta incursão, necessariamente breve, no pensamento cartesiano, sublinhando as palavras com que Koyré termina o seu encantador livro «*Considerações sobre Descartes*»:

"Pela minha parte, julgo que a injunção cartesina, que a mensagem cartesiana nunca foram tão actuais como hoje. (...) numa época de mito renascente e de autoridade infalíveis, precisamos mais do que nunca de obedecer ao preceito cartesiano que nos impede de admitir como verdadeiro outra coisa que não seja o que com toda a evidência vemos sê-lo; e permanecer fiéis à mensagem cartesiana que, proclamando o valor supremo da razão, e da verdade, nos impede que nos submetamos a uma autoridade qualquer, que não seja a razão e a verdade."
(Koyré, 1986, p. 93).

E atrevemo-nos a adiantar:

Talvez duvidando metodicamente tal como Descartes nos aconselhou, pondo em questão aquilo que julgamos saber, por mais infalível que nos pareça, pudéssemos evitar «cair» em concepções incorrectas, o que tantas vezes sucede.

Para **Leibniz**, outro grande matemático, o Universo também era explicado em bases racionais. Mas enquanto Descartes considerava os conceitos fundamentais do conhecimento praticamente em forma acabada na razão humana, Leibniz entendia que eles estavam apenas em embrião. O racionalismo de Leibniz, tal como o de Descartes, fazem assentar tudo o que existe, e o garante da verdade acerca do que existe, em Deus. Para Leibniz, as «verdades eternas», ou seja as verdades da razão, entre as quais se incluem os grandes princípios matemáticos, derivam de Deus, a «*Mónada* suprema*», por necessidade metafísica. As «*verdades de facto*» derivam d'Ele apenas por necessidade física ou moral.

Em **resumo**:

Para os racionalistas do século XVII, a razão divina está na génese das ideias que a mente humana produz e é, por isso, o garante da sua validade. Este é o «preço que pagaram» pensadores como Descartes, Leibniz, Malebranche e outros por sonharem ainda com uma Ciência do real, do autêntico, pretendendo explicar, verdadeira e completamente, os fenómenos universais e ambicionando a uma razão explicativa única para todo o conhecimento. A Matemática não poderia servir de base, porque estava desgarrada da realidade: o seu rigor e exactidão provêm precisamente do facto de lidar com entes ideais, não existentes na Natureza (na Natureza não há o ponto, o triângulo ou a circunferência). Por outro lado, rejeitavam que a génese das ideias estivesse nas impressões sensoriais, porque estas diferem dos objectos que as produzem e as ideias, por sua vez, ainda vão diferir das impressões sensoriais. Não aceitavam, pois, uma base empirista baseada nas percepções sensoriais. A Física aristotélica, que partia do senso comum e se baseava nas percepções sensíveis, tinha fornecido sobejas razões para desconfiar dos sentidos, pois estava contaminada com grandes erros provenientes do senso comum e dos sentidos (o geocentrismo, as leis da queda dos graves, etc.).

Não restava, pois, ao racionalismo outra alternativa se não uma base metafísica.

3. O racionalismo *stritu senso* do século passado

Nos séculos XVIII e XIX desenvolveu-se uma confiança ilimitada no poder da razão humana com o surgimento do Iluminismo, fruto do extraordinário desenvolvimento da ciência e da técnica, em que é justo realçar o enorme sucesso da Mecânica Racional. O racionalismo esforçou-se por construir um direito, uma moral e uma religião naturais acabando por assumir uma forma estritamente lógica (Hessen, 1987, pp. 66 e 67). A razão passou a ser encarada de um modo estritamente lógico, procurando libertar-se de aspectos emocionais e místicos, bem como do fardo da tradição.

O racionalismo do século passado privilegia uma razão essencialmente crítica, no sentido de Kant, combatendo a superstição, a idolatria e toda a espécie de preconceitos e autoridades não reconhecíveis por ela própria. É o século em que os racionalistas acreditavam estar a razão na base das grandes construções da ciência a que iam assistindo, na origem da confirmação das mais variadas previsões científicas.

4. O racionalismo construtivista

Acerca do racionalismo do nosso século muito haveria a dizer. Mas parece-nos suficiente, num trabalho desta natureza, referir apenas um filósofo racionalista, porque tinha uma grande cultura a respeito da Ciência, particularmente da Física: Gaston **Bachelard** (1884-1962).

Com efeito, Bachelard começou por ser professor de Física antes de se ter transformado num dos mais eminentes epistemólogos do nosso século.

Este conhecido pensador defendia a existência de obstáculos epistemológicos que se levantam ao pensamento científico. Era um epistemólogo descontinuista, defendendo a existência de uma ruptura epistemológica entre o conhecimento comum e o conhecimento científico.

Na sua obra «*O Materialismo Racional*» escreve: "*A ruptura entre o conhecimento comum e o conhecimento científico parece-nos tão nítida que estes dois tipos de conhecimento não poderiam ter a mesma filosofia. O empirismo é a filosofia que convém ao conhecimento comum. O empirismo encontra aí as suas raízes, as suas provas, o seu desenvolvimento. Pelo contrário, o conhecimento científico é solidário do racionalismo e, quer se queira quer não, o racionalismo está ligado à ciência, o racionalismo conhece uma actividade dialéctica que impõe uma extensão constante dos métodos*" (Bachelard, 1990, p. 260).

Para compreender a linguagem da Ciência actual torna-se necessário romper com os conhecimentos próprios do senso comum, adquiridos empiricamente, e com isso toda uma cultura já adquirida.

Assim, por exemplo, no trajecto para o significado preciso de átomo, na Física actual, toda a espécie de conhecimentos figurativos que provêm do contacto com cartazes e alguns livros, do tipo «bolinhas com ganchos», são autênticas barreiras que o pensamento coloca a si próprio.

A razão humana, tal como Bachelard a concebe, é uma **razão polémica, não cartesiana**, porque a Ciência Moderna assumiu a consciência das suas limitações, no que respeita ao conhecimento da verdade e porque, de facto, *não há fenómenos simples, naturezas simples, ideias simples*. Os objectos do conhecimento científico nunca são seres individuais, mas, sim, relações complexas. Cada fenómeno é "*um tecido de relações*", cada substância é "*uma contextura de atributos*" e cada ideia simples "*está inserida num sistema complexo de pensamentos e de experiências*" (Bachelard, 1986, p. 105).

Portanto, ao contrário do que pensava Descartes, o conhecimento científico não é decomponível em ideias simples. O pensamento científico moderno, o «*novo espírito científico*» de que Bachelard gostava de falar, vai-se formar no estudo precisamente dos fenómenos complexos, com toda a complexidade e esoterismo a eles inerentes - como, aliás, enfatiza também o pensador Edgar Morin.

Ao empirismo moderno, segundo o qual a mente deve inspirar-se nos factos, arriscar hipóteses, e recorrer, em última instância aos factos experimentais para julgar da veracidade dessas hipóteses, Bachelard contrapõe **um racionalismo construtivista** que realça o poder dos conceitos e das teorias na construção do conhecimento, como fontes de permanentes verificações e reconstruções. A Ciência, de certo modo, fabrica os próprios seres.

Não há experiência sem teoria. Como podemos pensar em experiência sem teoria se os próprios aparelhos experimentais são "*teorias materializadas*"? Uma experiência científica com sucesso é sempre uma "*razão confirmada*" (Bachelard, 1986, pp. 12 e 16).

Bachelard *liberta-se do aforismo*, tão conhecido em Física, segundo o qual «*só se conhece o que se mede*». A sua crítica é ontológica. Ele revela o contra-senso contido na crença de que a Ciência aprisiona cada ser nas malhas de uma medida cada vez de maior precisão (Dadognet, 1986, p. 18).

Podemos afirmar que *o racionalismo de Bachelard é ao mesmo tempo idealista e materialista*. Parece um contra-senso mas não é. A Ciência é uma actividade que se vive racionalmente através de uma solidariedade interconceptual. Dessa solidariedade resultam *as teorias* e estas *fabricam a própria realidade*. A realidade do electrão não é o electrão em si, mas, sim, as ideias que a Ciência tem conseguido construir acerca dele. É o próprio sistema a produzir a realidade. Podemos, portanto, dizer que o seu idealismo ressuscita o realismo. (Dadognet, 1986, p. 21). Há uma *realidade: aquilo que a Ciência conhece* e tal como a Ciência em cada momento a conhece. O *quark u* é uma realidade. Provou-se que ele existe, porque já se construiu uma teoria que efectuou previsões acerca dele e se fizeram experiências que confirmaram essas previsões. E nada mais.

Ao terminar esta visão histórica sobre o **racionalismo**, resumimos as suas **características fundamentais**:

- o conhecimento dedutivo, de inspiração matemática, é o ideal da Ciência, porque na sua apreensão todos os passos são absolutamente necessários e não contingentes;
- o pensamento possui em si ideias e princípios não extraídos da experiência, a partir dos quais se pode construir o edifício do nosso conhecimento;
- há uma consciência, seja ela una e infinita ou colectiva, que garante a correspondência entre a ordem do pensamento e a ordem da realidade;
- há a convicção de que:
 - é possível deduzir ou construir o nosso conhecimento a partir de certos princípios racionalmente aceites;
 - tudo o que se deduz pelo nosso pensamento é necessário e não contingente;
 - a realidade, complexa ou simples, é exactamente o que pensamos.

3.5.3 Breve história do empirismo

Ao contrário dos racionalistas, os empiristas consideram que o valor dos nossos conhecimentos reside na experiência. A sua tese geral é a de que todas as nossas ideias provêm da experiência.

Podemos dizer que a sua divisa é a conhecida afirmação «*Nihil est in intellectu quod prius non fuerit in sensu*» (*Não há nada no entendimento que primeiro não tenha estado nos sentidos*).

1. O empirismo como concepção constante ao longo do desenvolvimento filosófico

O empirismo, como visão do conhecimento, é uma das constantes ao longo do pensamento. Assim, já o nominalista **Ockam**, no século XIV, com a sua concepção de que apenas temos acesso à causa de um fenómeno através da observação, pode

considerar-se um precursor do empirismo moderno. Para Ockham, o conhecimento das realidades individuais (as únicas que existem) é intuitivo, directo e imediato, não havendo mecanismos intermédios entre o sentir um objecto e o conhecê-lo. Considerando o Universo com uma ordem fáctica, contingente, e não com uma ordem racional, sem princípios gerais a governá-lo, o único processo de o conhecer seria a investigação empírica.

Francis Bacon, o autor do «*Novum Organum*», publicado em 1620, preconizou para a Ciência um *método indutivista*, a que mais tarde nos referiremos, que se baseia essencialmente em observações empíricas e no registo dessas observações em tábuas. Embora a sua concepção da Ciência apresente insuficiências e distorções, o indutivismo baconiano influenciou muitos filósofos empiristas nos séculos posteriores e deixou marcas no modo incorrecto como ainda hoje é vista a construção da ciência.

2. O empirismo moderno ou empirismo inglês do século XVIII

O empirismo moderno surgiu na Inglaterra no século XVIII como uma confrontação histórica ao racionalismo do século XVII.

No primeiro livro da sua obra «*Ensaio sobre o Entendimento Humano*», John **Locke**, contemporâneo de Newton, rejeita a existência de ideias inatas, um dos «grandes cavalos de batalha» dos racionalistas do século XVII. Se as houvesse, as crianças, os incultos e os selvagens não desconheceriam por completo princípios considerados inatos como o princípio da identidade e o da contradição (Leroy, 1985, p. 27). Anteriormente à experiência porque vamos passando, somos como uma página em branco onde nada está escrito. Todas as nossas ideias são produzidas pela experiência. O grande objectivo deve ser, segundo Locke, conhecer a génese das nossas ideias a partir da experiência, afinal um dos grandes objectivos do trabalho que viria a ser desenvolvido no nosso século pela Psicologia genética.

A experiência é a origem e o limite do nosso conhecimento. A nossa capacidade de entender o mundo é duplamente limitada:

- *quanto à extensão* - o entendimento não pode ir além do que a nossa experiência mostra;
- *quanto à certeza* - só há a certeza daquilo que cai dentro dos limites da experiência.

A experiência que temos do mundo proporciona-nos ideias acerca dele. As nossas ideias acerca da realidade exterior são imagens ou representações dessa realidade.

O conhecimento de um sistema, a ideia complexa que dele fazemos, a ideia de uma flor, por exemplo, é uma «*rede atômica de átomos de conhecimento*», que são as ideias simples que vamos recolhendo das suas diversas partes. É algo, passe a imagem grosseira, como um sólido que passou a conhecer-se ao cristalizar a partir de uma mistura desconhecida de átomos.

O filósofo irlandês **Berkeley** (1685-1753), cujo idealismo será referido a propósito do problema da essência do conhecimento, tentou levar logicamente até ao fim os princípios empiristas de Locke, acabando por cair no acosmismo.

O empirista David **Hume** distingue entre *conhecimento factual* (as *verdades de facto* de Leibniz) e *conhecimento de relações entre ideias* (as *verdades de razão* de Leibniz). O conhecimento de factos fica limitado às impressões actuais e às recordações de impressões passadas. No que se refere aos factos futuros, não temos qualquer conhecimento verdadeiro, porque não temos quaisquer impressões sensoriais a seu respeito. Quanto aos factos futuros, apenas podemos ter uma crença de que sejam verdadeiros e a *inferência causal* que fazemos *tem raiz empírica*: assenta na *repetibilidade* com que vimos a causa produzir o efeito (27).

A inferência causal só é, portanto, aceitável entre impressões. A partir de uma impressão sensível não podemos concluir sobre a realidade de algo de que não tenhamos impressão sensível (28).

Resumindo as principais ideias de Hume acerca do conhecimento do mundo físico, porque elas são paradigmáticas de um **empirismo consequente**, temos:

- As impressões que temos no dia a dia são dados primitivos com que conhecemos a realidade e para os quais não há que encontrar qualquer justificação.
- Não há qualquer conexão necessária entre percepções, mas, apenas, uma sucessão ou continuidade delas.
- A realidade cinge-se às percepções dos fenómenos, já que não conhecemos qualquer realidade exterior diferente dessas percepções.

Mais do que um empirismo, a filosofia de Hume é um **fenomenismo***, na medida em que admite que nada existe por trás das percepções dos fenómenos, aparecendo elas simultaneamente como impressões (as nossas sensações, paixões e emoções) e ideias (imagens empalidecidas daquelas). Assim sendo, não apresenta qualquer resposta para a questão da *origem das nossas sensações*, ao contrário de Locke que via nestas imagens do mundo existente para além das percepções (Berkeley afirmava que as sensações provêm de Deus).

3. Consequências do empirismo inglês do século XVIII

Foi grande a influência de Locke e dos restantes empiristas ingleses do século XVIII na Filosofia.

Assim, o preconceito empirista que absorve na experiência todo o campo do nosso conhecimento faz-se sentir em toda a corrente sensista. O **sensismo** é a doutrina gnosológica que considera os sentidos a fonte única do conhecimento.

Condillac (1715-1780) é o pai do sensismo francês. Segundo o autor do «*Tratado das Sensações*» toda a operação do espírito é uma sensação transformada. Assim, uma sensação que, pela sua intensidade, se torne dominante e exclusiva, constitui a *atenção*. A persistência no espírito de uma impressão causada pelos sentidos é a *memória*. A atenção simultânea a uma impressão presente e a outra impressão

passada é a *comparação*. Um *juízo* não é mais do que a percepção de semelhanças e diferenças entre sensações diferentes. A *reflexão* é uma repetição de juízos e comparações. A *imaginação* surge quando, perante uma sensação desagradável, se recorda uma sensação agradável. O entendimento não é mais do que o conjunto das sensações assim geradas.

Kant começou por ser um racionalista. Porém, impressionado pela filosofia de Hume, acabou por abandonar o racionalismo puro afirmando que o nosso conhecimento não pode estender-se para além do mundo sensível. A posição que Kant assumiu perante o problema da origem do conhecimento será tratada na secção 3.5.4.

Todo o **materialismo pós-hegeliano**, de que trataremos a propósito do problema da essência do conhecimento, é influenciado pelo empirismo inglês do século XVIII.

O mesmo sucede com o **positivismo** e o **sensismo** do século passado. Assim **Stuart Mill** (1806-1873) considerava todo o conhecimento como produto das impressões fornecidas pela experiência. Esta é, pois, a fonte de todo o saber. Como empirista ultrapassou, mesmo, Locke e Hume, pretendendo reduzir também o conhecimento matemático à experiência. Ou seja: *as próprias leis lógicas do pensamento são, no fundo, leis empíricas* (Hessen, 1987, p. 73).

O conhecimento, para Mill, é uma soma de observações concretas, é o resultado de um acumular de dados individuais estabelecidos através dos sentidos. Neste sentido, Mill preocupa-se em desenvolver uma **lógica indutivista**, na sequência do trabalho de Bacon, para garantir a obtenção de regularidades nos dados observados, estabelecendo assim factos a partir destes (29).

O **empiriocriticismo** fundado pelo filósofo francês **Avenarius** (1843-1896), como filosofia de puro carácter científico, ambicionando à completa libertação da metafísica, com o objectivo de se voltar à «concepção natural do mundo», e que também foi defendida pelo físico e filósofo austríaco **Mach** (1838-1916), que

pretendeu libertar a Física newtoniana de todos os elementos apriorísticos, também revela toda a influência empirista. E o mesmo sucede com o **movimento analítico** do nosso século, tratado noutro local.

Em **síntese**, podemos afirmar que o **empirismo**:

- é uma concepção que influenciou e continua a influenciar, mais ou menos preponderantemente, as ideias filosóficas de muitos pensadores;
- tem uma ânsia de rigor que leva a dar a maior importância à evidência mais imediata que é a do objecto da experimentação;
- possui uma tendência vincadamente anti-apriorística e predominantemente materialista, indutivista e positivista;
- não só considera absolutamente necessária a experiência como pretende fazer dela o ponto de partida exclusivo do conhecimento.

3.5.4 Posições superadoras entre o empirismo e o racionalismo

1. O intelectualismo

Na história do metaconhecimento, e a propósito do problema da origem do conhecimento, apareceram algumas posições filosóficas que não são nem empiristas nem racionalistas. São posições que rotulamos dialecticamente de *superadoras* dessas duas correntes opostas que são o empirismo e o racionalismo. Uma dessas posições filosóficas é o *intelectualismo* (Hessen, 1987, pp. 74- 77).

Aristóteles e os demais intelectualistas *defendem, tal como os racionalistas*, que há juízos universalmente válidos e logicamente necessários, mas opõem-se aos racionalistas pois consideram esses juízos derivados da experiência e não como um património *a priori* da razão.

Por outro lado, *defendem, tal como os empiristas*, que os conhecimentos provêm dos sentidos, mas, enquanto que os empiristas consideram que no pensamento não há nada de novo em relação aos dados da experiência, os intelectualistas afirmam que os conceitos produzidos a partir das representações sensíveis estão muito para além destas e são obra da razão.

Os intelectualistas *assentam o conhecimento quer nos sentidos quer na mente* e não podem ser considerados nem empiristas nem racionalistas. Porém, até certo ponto, podem considerar-se mais próximos dos primeiros do que dos segundos, já que aceitam o princípio atrás referido segundo o qual *«não há nada no intelecto que não tenha passado pelos sentidos»*.

Assim, por exemplo, Aristóteles afirmava que *"o entendimento trabalha como a luz"*. Ilumina, torna transparentes as imagens sensíveis, permitindo ver no fundo delas as essências (Hessen, 1987, p. 76).

Baseado na Filosofia aristotélica, acabou por se impor o **tomismo**- a filosofia de São Tomás de Aquino. Como é que ela explicava o conhecimento de um objecto individual?

Um objecto individual (uma mesa, por exemplo) contém:

- a essência ou «matéria em geral», que partilha com todos os outros entes da mesma espécie (com todas as outras mesas);
- os elementos estritamente peculiares ou «matéria concreta» desse ente individual (dessa mesa).

O conhecimento humano incide sobre os objectos individuais (as diversas mesas, por exemplo). Estes objectos individuais são reais (cada mesa é uma realidade). A partir de cada objecto individual, formam-se percepções sensíveis (da cor, da forma, etc.). As percepções sensíveis deixam na memória uma imagem ou representação particular desse objecto individual. A seguir, o **entendimento** exerce a sua **capacidade abstractiva**, isto é, despoja estas imagens dos seus elementos individuais e elabora o conceito universal, que é ideal, a partir dos dados percebidos. Assim:

Percepções a partir das mesas —————→ Conceito de mesa

Individualidade das percepções —————→ Universalidade dos conceitos
abstracção

O sujeito cognoscente, face a um ser individual, começa por fazer sobressair a essência, toma primeiro consciência desta. Só depois de formar o conceito universal acerca do objecto individual é que o entendimento reconhece esse objecto individual. Portanto, o conhecimento de cada objecto individual pelo entendimento “*realiza-se de modo secundário e indirecto*” (Cordon e Martinez, 1985, p. 118).

O entendimento conhece, directamente, a essência universalizada (por exemplo, a essência ser humano) e só depois o indivíduo (o ser humano individual) que constitui o ponto de partida do processo.

São Tomás, tal como Aristóteles, tem uma concepção finalista, teleológica do Universo. A sua totalidade encontra-se sujeita a uma ordenação, a uma *lei eterna*. Esta não regula do mesmo modo o ser humano e os outros seres. O ser humano, como ser livre e racional que é, pode conhecer a tendência finalista do mundo e conduzir-se por uma *lei moral*. Os outros seres, porque são irracionais, comportam-se segundo *leis físicas*.

Vemos, pois, que para os intelectualistas há leis universais logicamente necessárias e universalmente válidas e, nisto, eles comparam-se aos racionalistas.

2. A nova atitude científica revela-se superadora

A actividade intelectual dos fundadores da Ciência Moderna, Copérnico, Kepler, Galileu, Descartes, etc., fosse qual fosse a sua posição filosófica, racionalista ou empirista, indutivista ou dedutivista, acabou sempre por se pautar por uma atitude científica, fruto de um novo espírito científico que manifesta igual respeito pela *razão* e pelos factos resultantes da *experiência* na construção do conhecimento.

Kepler, por exemplo, era filosoficamente um racionalista místico, marcado pelas filosofias pitagórica e platónica, mas soube guiar a sua razão pelos factos, em vez de a guiar por valores metafísicos.

Quando afirmamos que Kepler era filosoficamente um racionalista, é porque ele considerava a existência de uma ordem racional no Universo, de uma harmonia celeste a que tínhamos acesso através do pensamento e não dos sentidos, que considerava deturpadores da realidade.

Assim, e a respeito das órbitas planetárias, por exemplo, na intimidade do seu pensamento estava a crença de que essas órbitas deveriam ser circulares. Elas eram deformadas ligeiramente (a excentricidade é pequena) pela acção das “*faculdades naturais e animais*” (Cordon e Martinez, 1987, 2º vol., p. 56).

Porém, como Kepler estava imbuído de um novo espírito científico, soube recorrer ao veredicto das observações empíricas que Brahe tinha feito acerca, principalmente, da órbita do planeta Marte e, o que é também importante, soube render-se à evidência dessas observações.

Se, por um lado, Kepler acreditava numa ordem racional no Universo, por outro lado ele manuseava os seus dados observacionais como peças de um «puzzle». Principalmente a sua terceira lei, também chamada lei dos períodos dos planetas ou lei da harmonia do sistema solar, foi descoberta por *tentativa e erro*, aquilo a que Cordon e Martinez (1987, p. 58) chamam “*um fatigante tacteamento no empírico, sem a guia da razão.*”

O que não há dúvida é que alguma coisa movia Kepler na procura laboriosa dessa harmonia celestial. Procurou esta, porque acreditava numa razão para ela. Uma razão de ordem física? Não, pois esta só apareceu com a lei da gravitação de Newton, que nem ele nem Galileu estariam ainda em condições de poder atingir. *Tudo em ciência, como construção que é, tem o seu momento próprio.* Uma telha não pode ser colocada antes de um tijolo da fundação. É por isso que a Teoria da Relatividade Restrita não surgiu no tempo de Galileu. A razão que Kepler procurava atingir, a causa da racionalidade em que acreditava não era, não podia sê-lo nessa fase de desenvolvimento da Ciência, de ordem física. Ela era, sim, de ordem metafísica: Deus!

Kepler era, de facto, um racionalista místico. A sua obra revela-nos numerosos indícios disso. A adopção do heliocentrismo, por exemplo, foi guiada por algumas razões de ordem mística (30).

Concluimos, assim, que Kepler, pese embora o seu enorme espírito científico e o seu grande contributo para a construção da Ciência Moderna, ainda conservava um apego à metafísica pitagórica e platónica. Não conseguiu libertar-se, completamente, desse clássico cisma metafísico.

Galileu, considerado o «*pai da Ciência Moderna*», tem sido usado por vários racionalistas e por empiristas para se degladiarem acerca da primazia da experiência ou da razão.

Uns afirmam que a obra de Galileu apoia a tese do racionalismo, que ele não efectuou as experiências que refere ter efectuado, como, por exemplo, a do plano inclinado, porque se tivesse efectuado aquilo que descreve, teria sido conduzido a resultados dos quais nada conseguiria concluir. Obtinha os resultados experimentais por mera dedução matemática e depois afirmava ter verificado experimentalmente aquilo que sabia de antemão que era certo.

Outros, porém, afirmam que o seu trabalho dá razão aos empiristas, porque ele fazia as experiências, induzia as conclusões a partir dos dados experimentais e só depois tentava demonstrar pela Matemática o que tinha verificado experimentalmente (31).

O que é mais verosímil, do ponto de vista histórico, é que Galileu punha o raciocínio a dirigir a observação e a observação a desenvolver a capacidade de raciocinar, de modo a constituir um todo harmonioso entre razão e experiência e onde é difícil descortinar qualquer primazia de uma pela outra.

Afirmámos que Kepler não se conseguiu libertar totalmente do cisma da metafísica. E Galileu? Conseguiu este, por sua vez, libertar-se totalmente dos preconceitos escolásticos?

Na verdade não, como veremos. Toda a gente conhece a luta de Galileu pela separação dos poderes da Igreja e da Ciência, querendo ele pactuar com as duas. Não vamos aqui discutir se a sua luta teria sido ou não conduzida da forma mais correcta, sendo um facto que pagou bem caro o apego às suas crenças religiosas (32). Vamos, sim, prestar homenagem ao modo digno como Galileu se bateu pelo seu grande objectivo - a libertação da Ciência das amarras da Teologia - e ao modo brilhante como ele soube apelar aos leitores das suas obras para a reflexão científica, utilizando notáveis "*recursos literários como instrumento, tal como quando usava a Matemática para a levar aos seus colegas*" (Drake, 1981, p. 140).

Do ponto de vista científico, Galileu deu sobejas provas de possuir aquele novo espírito, bastante crítico, que surgiu com a Renascença, tentando libertar-se das amarras dos preconceitos aristotélicos. Porém, tal como Kepler, ainda havia nele reminiscências da Filosofia platónica. Assim, deu bastante ênfase aos círculos e ao movimento circular, e não conseguiu aderir à ideia kepleriana de que as órbitas são elipses. Tal facto impediu-o de formular, em termos correctos, a lei da inércia. Possuía a concepção incorrecta da existência de uma inércia em movimento circular uniforme, por preconceito do foro metafísico.

Quer dizer: para Galileu, um corpo em órbita circular em torno da Terra move-se por inércia, sem ser actuado por qualquer força exterior. Foram Descartes e Newton que viriam a formular, de modo correcto, a lei da inércia.

Com Galileu e, a seguir, com Newton, as observações empíricas e os raciocínios matemáticos dedutivos foram usados com mestria para estabelecer as bases da Mecânica Racional. A Matemática deixou de ser o fundamento do saber para se converter em ferramenta imprescindível para compreender o mundo físico.

Com os «*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*», **Newton** ambicionava cumprir o programa empírico-indutivista iniciado por Bacon (1561-1626) e também defendido por Boyle (1627-1691). No livro III dessa obra imortal, Newton apresentou as suas famosas «*Regras do Filosofar*».

A primeira é o princípio da parcimónia - herança de Ockham. A segunda é o princípio da causalidade - da Lógica. A terceira é uma regra de extrapolação e a quarta regra prova que Newton conhecia e concordava com a prioridade da indução empírica como método (33).

A visão empírico-indutivista de Newton transparece claramente no prefácio à primeira edição do *«Principia»*. Nessa introdução, Newton defende que a própria **Geometria** “*está fundada na prática mecânica e não é mais do que aquela prática da mecânica universal que rigorosamente propõe e demonstra a arte de medir*”. Digamos que a Geometria é considerada por ele a Mecânica do “*rigor perfeito*”.

A essência da Filosofia consiste em “*a partir dos fenómenos mecânicos investigar as forças da natureza e, então, dessas forças demonstrar os outros fenómenos*”.

Porém, ao desenvolver a sua obra, Newton dá razão plena a Einstein, quando este avisou todos os que pretendem saber como trabalha um cientista a não ligarem ao que o cientista diz, mas, sim, a observarem o que ele faz. O que fez Newton? Uma obra eminentemente dedutiva, que se assemelha muito mais a um tratado racional de geometria euclidiana do que a uma obra de um físico indutivista. Os *«Principia»* são uma obra com uma estrutura formal dedutiva, conforme realçaremos posteriormente.

Ontologicamente, Newton tinha uma *visão dualista* numa espécie de *união entre um atomismo e a divindade*. A explicação de Newton para a gravidade (a sua lei da atracção universal media mas não explicava...) baseia-se num éter subtil, mas de tal modo embebido em misticismo que tudo leva a supor que a razão última dessa gravidade estava mesmo em Deus. Para Newton a gravidade era algo que sempre o intrigou. E supunha que tivesse muito mais a ver com o espaço absoluto, que existe independentemente dos corpos e para além deles, do que com a constituição dos corpos. As suas tentativas para demonstrar a existência do espaço absoluto foram em vão (34).

Com o triunfo da Ciência Moderna, cada vez se tornou mais desnecessário recorrer a Deus como hipótese explicativa para o conhecimento da Natureza (o físico Laplace poderia no século passado responder a Napoleão que não tinha introduzido Deus no seu sistema determinista explicativo do mundo por o considerar uma hipótese desnecessária). (35). Mas nem por isso, o conflito entre o empirismo e o racionalismo, como grandes respostas históricas ao problema da origem do conhecimento, ficou resolvido. O ideal da Ciência Moderna é o de um sistema formal, dedutivo, onde, partindo de grandes princípios, se estabelece uma construção explicativa coerente do Universo. De onde provêm esses princípios? Como é possível formulá-los?

Os *racionalistas* afirmam que tais princípios (os da conservação, os grandes princípios da lógica) provêm da razão, e proclamam a auto-suficiência da razão como fonte de conhecimento.

Os *empiristas* afirmam que esses grandes princípios provêm da experiência sensível e a sua validade reside exclusivamente na experiência.

Entretanto um grande filósofo do século XVIII e profundo conhecedor da Ciência newtoniana apresentava uma grande síntese filosófica entre o empirismo e o racionalismo. Essa síntese é o *apriorismo kantiano*.

3. O apriorismo

O *apriorismo* é uma resposta histórica ao problema da origem do conhecimento, superadora do racionalismo e do empirismo. Também ele considera que o nosso conhecimento apresenta elementos *a priori*. Mas, ao contrário dos racionalistas, que defendem que os elementos *a priori* são autênticos *conteúdos* de conhecimento, os aprioristas consideram que os elementos *a priori* são apenas *formas* de conhecimento a que correspondem conteúdos provenientes da experiência.

A afirmação típica que caracteriza o apriorismo é a seguinte frase de Kant: “os conceitos sem as intuições são vazios, as intuições sem os conceitos são cegas” (Hessen, 1987, p. 78, Vancourt, 1991, p. 22). Quer dizer, a mente humana contém conceitos *a priori*, grandes princípios como o da contradição, o da causalidade, etc., que utiliza para estabelecer o conhecimento, mas não têm valor algum se forem aplicados a algo de que não temos experiência sensível.

Kant é o expoente máximo do apriorismo. Admitia um factor racional no conhecimento, absolutamente desligado da experiência (contrariamente aos intelectualistas como Aristóteles), e também um factor empírico fundamental. É por isso que o pensamento de Kant é considerado uma síntese entre o racionalismo do século XVII e o empirismo moderno ou empirismo inglês do século XVIII.

Vejamos, com um exemplo concreto, o que distingue Kant dos empiristas Locke e Hume.

Suponhamos uma rosa. O que é essa flor? Que conhecimento temos dela?

Hume responderia que a rosa não é mais do que a cor, o cheiro, a forma e todas as restantes sensações que nos fornece. Segundo ele, a Ciência limitar-se-ia a estudar essas sensações, mas sem ter qualquer pretensão de elas corresponderem a qualquer substracto, a qualquer ente. Não há que racionalizar nada, pois nada há para racionalizar. E não há que discutirmos a origem dessas sensações, porque nada existe por trás delas. Há tão só que realizar experiências de modo a conhecer o melhor possível as sensações que temos da rosa.

Locke estaria de acordo com Hume, excepto no facto de que admite a existência de um material, um substracto, uma origem dessas sensações, real mas incognoscível.

Finalmente, Kant afirmaria que possuímos *a priori* a ideia de um material, uma «*substância*», um conceito inicialmente vazio. É a observação experimental da rosa que vai «encher» ou enriquecer esse conceito, à medida que nele se vão unificando

todos os dados sensíveis (a cor amarela por exemplo, o cheiro, etc.) de modo a termos um conhecimento cada vez melhor dessa flor. Se não tivéssemos conhecimento da existência «a priori» de um suporte que está subjacente às sensações que a rosa nos provoca, uma das «categorias» de Kant, a que ele chama «substância» (não pode ser identificado com o conceito científico actual de substância, aproxima-se mais do conceito genérico de matéria), afirmações como «a rosa é amarela» ou «a rosa cheira bem» não tinham sentido.

Influenciado pelo trabalho de Newton, Kant distingue conhecimento sensível e conhecimento do entendimento. O primeiro tem como categorias ou conceitos puros o espaço e o tempo. Estes conceitos são apriorísticos e não derivam da experiência, pois não pode haver conhecimento sensível de um objecto sem ser no espaço e no tempo.

O conhecimento da Natureza é realizado por meio de conceitos. A Ciência é, segundo Kant, um conjunto ordenado de teorias baseadas em relações entre conceitos e sujeitas a princípios. E só podemos chamar conhecimento científico genuíno àquele cuja certeza é apodíctica. (Kant, 1990, pp. 14 e 15). Esta compõe-se, portanto, essencialmente de juízos ou proposições cientificamente correctas (36). Nestas é sempre necessário um conceito para enquadrar as impressões sensíveis. Sem o conceito de corpo não podemos falar acerca das suas propriedades. Mas há dois tipos de conceitos: os *conceitos empíricos, a posteriori*, obtidos comparando seres da mesma espécie e de espécies diferentes; e os *conceitos a priori, conceitos puros ou categorias* que são “representações em que nada se encontra que pertença à sensação” (1994, p. 62). São “formas puras da sensibilidade”, “intuições puras”. Estas são condições transcendentais necessárias para o nosso conhecimento dos fenómenos. Mas como são vazias de conteúdo empírico, só por si também não estabelecem conhecimento algum e não podem utilizar-se a não ser no campo das percepções sensíveis (37).

Kant apresentou duas classificações para os juízos científicos (38):

1ª classificação-

Os juízos são *siméticos* quando ampliam, acerca de um conceito, o conhecimento que está intrínseco nesse conceito. Ex: «*a rosa é amarela*» (no conceito rosa não está incluído o facto de ser amarela).

Os juízos são *analíticos* quando não ampliam, acerca de um conceito, o conhecimento que está intrínseco nesse conceito. Ex: «*o todo é maior do que qualquer parte dele*» (no conceito de todo já está intrinsecamente englobado o facto de ser maior que qualquer das partes).

2ª classificação-

Os juízos são *a priori* quando a sua fundamentação não carece da experiência. Ex: «*todo o efeito tem uma causa*».

Os juízos são *a posteriori* quando a sua fundamentação é experimental. Ex: «*todo o corpo de cortiça flutua na água*».

Segundo o empirista *Hume*, as duas classificações coincidem, pois *todos os juízos siméticos são a posteriori*.

Mas *Kant* admitia a existência de juízos sintéticos *a priori*. E mais do que isso: considerava os **princípios fundamentais da Ciência** como sendo **juízos sintéticos a priori, universais e necessários**.

Vejamos, a título de exemplo, o princípio da causalidade: «*tudo o que acontece é o efeito de uma causa e a mesma causa produz sempre o mesmo efeito*».

É um juízo sintético, pois no facto de algo acontecer não está contido o facto de ter uma causa anterior.

Segundo *Hume*, é um juízo de facto, porventura universal mas não necessário. É uma generalização resultante do facto de, repetidas vezes, termos observado fenómenos a implicar outros fenómenos que lhes são consequentes: o vento a abanar o ramo da árvore, a flecha a projectar a seta, etc. O princípio da causalidade é, pois, uma afirmação *a posteriori* e não *a priori*.

Kant discorda, afirmando que Hume confunde as leis particulares causais com o grande princípio da causalidade. Para ele, o princípio da causalidade é uma afirmação *a priori*, já que a sua veracidade não se fundamenta na experiência.

Concretizemos a argumentação de Kant com a afirmação: “*o calor dilata um corpo.*”

Há uma causa (o calor), e um efeito (a dilatação dos corpos). Kant entende que este tipo de juízos particulares em que um efeito se sucede a uma causa é uma afirmação sintética a posteriori. De facto só a experiência poderá mostrar que um corpo é ou não dilatado pelo calor (se for gelo a 0 graus até não é, devido à destruição das ligações por pontes de hidrogénio, como hoje sabemos). O que Kant não confunde é uma lei particular causal, como esta, com o princípio da causalidade. Isto é: se o gelo a 0º se contrai há uma causa, e existindo essa causa o efeito terá de ser sempre o mesmo nas mesmas condições. Se as pontes de hidrogénio se destruírem (causa), não acontece umas vezes o gelo contrair-se e outras dilatar-se.

O princípio da causalidade, o da não-contradição, os postulados matemáticos, os grandes princípios da Física newtoniana têm uma fundamentação não experimental. Não provêm da experiência, antes a condicionam. No fundo, os grandes princípios da Mecânica newtoniana têm que ver, em última análise, com o espaço e o tempo. Já em Newton, o espaço e o tempo são realidades independentes de nós e dos objectos. Para Kant, eles são intuições puras, formas *a priori* da nossa sensibilidade (39). Se esses princípios fundamentais da Mecânica são juízos sintéticos e não provêm da experiência, qual é a origem deles? É a razão pura, isto é a razão em si mesma, despida de toda a espécie de deturpação proveniente dos sentidos (e só assim capaz de não nos enganar e produzir os primeiros princípios que regem o conhecimento da Natureza).

Resumindo o **pensamento de Kant** a respeito do problema em questão:

1º - para conhecer a Natureza, a mente humana possui conceitos puros que aplica aos dados sensíveis e apenas a estes;

2º - a Ciência é formada por juízos sintéticos ou analíticos, *a priori* ou *a posteriori*, mas os princípios fundamentais da Ciência são juízos sintéticos *a priori*;

3º - a razão pura procura encontrar juízos cada vez mais gerais, constituindo princípios susceptíveis de abarcar conceptualmente uma multiplicidade de juízos particulares acerca de uma multiplicidade de fenómenos;

4º - as realizações da Ciência devem submeter-se à crítica da razão pura.

3.6 Há uma dialéctica entre a razão e a experiência no estabelecimento da ciência física - 2º Princípio

Não deixa de ser curioso que, ao longo da história, uma grande parte dos maiores racionalistas foram grandes matemáticos (como Descartes e Leibnitz, por exemplo) ou filósofos apaixonados pela Matemática (casos de Platão, Malebranche, e, inicialmente, o próprio Kant), e uma grande parte dos empiristas provieram das ciências naturais (por exemplo, Mach e os físicos ligados à escola de Viena) ou, pelo menos, foram filósofos que tinham uma particular predilecção pelas Ciências da Natureza (casos de John Locke, David Hume, Stuart Mill, etc.). Este facto levou Hesse a distinguir entre conhecimento próprio das "*ciências ideais*" e conhecimento próprio das "*ciências reais*" (1987, p. 81). Estas designações não são felizes, embora se aceite que há diferenças ente a Matemática (que ele certamente considera uma «ciência ideal») e a Física (considerada por ele uma «ciência real») (40).

Quer a Física quer a Matemática fundam-se em grandes princípios com um significado epistemológico tão semelhante que *Kant* viu, em ambos, o mesmo tipo de afirmações - *juízos sintéticos a priori* (1994, pp. 46-49), e *Poincaré*, por sua vez, viu nessas afirmações autênticas *convenções*, cuja escolha é guiada por factos experimentais. (1970, pp. 67-69, 88, 89 e 151- 154). A diferença envolve a experiência, já que a evidência empírica da Física é feita com base em objectos da própria Física, tais como bolas, réguas, cronómetros, multímetros, etc., enquanto que a Matemática dispensa a evidência empírica, guiando-se exclusivamente por critérios de coerência, ou, se isto não é verdade (conforme alguns pensadores crêem), essa evidência empírica envolve objectos também físicos e não matemáticos.

Ainda assim, a Matemática e a Física tiveram histórias próximas, e hoje não se concebe a segunda sem a primeira. Será legítimo considerar-se a razão como a fonte do conhecimento matemático e a experiência como a fonte do conhecimento físico?

Quem conhecer de perto a história desta maravilhosa aventura do pensamento físico- matemático, que culminou no rompimento total do dualismo grego céu-terra (com a síntese newtoniana), que submeteu o mundo celeste à mesma Física do mundo sublunar, não pode deixar de ser sensível ao surgimento de um **novo espírito científico**. Este revela-se por uma **nova atitude epistemológica** que, quanto a nós, está no cerne da construção da Ciência Moderna. Essa atitude é muito mais do que um pretenso método científico, seja ele experimental, indutivo, ou racional e hipotético-dedutivo. Está muito para além de todas as orientações filosófico-metodológicas de cariz indutivista ou dedutivista. É uma atitude que resulta de um espírito capaz de se libertar de toda a espécie de amarras e preconceitos, em que a razão orienta, livre e adequadamente, a experimentação e é, por sua vez, guiada pelos dados experimentais recolhidos.

É esta *coerência entre razão e experiência, entre ideia e facto* (e não qualquer preconceito metafísico, por mais tradição que possua), o juiz supremo que confere validade às afirmações científicas. Estas afirmações são construídas com base numa *interacção dialéctica entre a razão crítica, levada ao seu estado de maior pureza possível* (pureza no sentido de libertação de preconceitos), e os dados sensoriais, uma confrontação entre as ideias e os factos. “*Um facto é uma ideia realizada*” e “*uma ideia é um facto idealizado*”, afirmava Edmund **Husserl** (1859-1938) o filósofo da fenomenologia (de *fenómeno* = o que se revela, e *logos* = fazer ver, revelar).

Em Galileu e em Kepler transparece, de modo claro, o esforço heróico para conseguir essa atitude científica, através de uma confrontação permanente (que assume, por vezes, o carácter de uma luta intensa, principalmente em Kepler, mais místico do que Galileu) entre uma atitude conservadora, metafísica, de manter a realidade em que se acredita (o Universo é perfeito, na sua concepção divina, as órbitas são circulares, o Sol é a manifestação de Deus Pai, etc.) e a nova atitude de pureza, de respeito total pelos dados da observação, pelos factos, ainda que isso signifique um choque psicológico, a não realização plena daquilo em que se acredita.

É esta atitude de libertação, este mesmo respeito por uma razão assente em factos, que mais tarde levou Einstein a conceber um universo considerado no mínimo extravagante, anti-senso comum. Teve a coragem de dar «*o salto no escuro*», coragem essa que faltou a sábios como Plank, Lorentz, Poincaré e outros, que não foram capazes de se libertar das amarras dos preconceitos criados pela sua crença no carácter completo da Mecânica newtoniana.

O novo espírito científico que Copérnico, Kepler, Galileu e os demais fundadores da Ciência Moderna ajudaram a desenvolver é essencialmente crítico: combatendo os preconceitos, mas tentando iluminar a ignorância; lutando contra a tradição, mas explorando a história das ideias; não se sujeitando à autoridade externa do *magister dixit*, mas procurando uma coerência e uma validade interna.

Esta nova maneira de participar na construção do conhecimento do mundo físico revela-se através da capacidade de analisar a experiência, orientá-la e colher frutos dela, construindo conhecimentos no que respeita ao mundo sensível com base numa aliança entre o empírico e o racional. E também se revela através de uma nova visão, mais positivista (no sentido de menos metafísica) do objectivo das ciências físicas, como resultado da interacção entre as ideias do sujeito cognoscente e os factos que a ele se revelam. Esse objectivo já não é o de exprimir rigorosamente o que sucede num mundo exterior ao sujeito, o que a Natureza verdadeiramente é em si (posição realista), para passar a ser a *explicação do mundo tal como se revela ao sujeito*, isto é, dos factos tal como aparecem aos «olhos da mente» de quem os interioriza, sem a preocupação filosófica com a relação que há entre o que aparece e o que realmente é. Em termos concretos, as questões deixam de ser fundamentalmente questões de *porquê* e de *essência* ou *realidade* («Porque há o movimento?», «Porque há o espaço e o tempo?», «Qual é a essência do espaço e do tempo?», etc.), para passarem a ser questões de *quê* e *como* («Que relação há entre o espaço percorrido e o tempo?», «Quais são as propriedades de um corpo, tal como se revelam?», etc.).

Esta nova atitude face à Ciência não privilegia nem os meios racionais nem os meios experimentais. Galileu, por exemplo, recorria a uns e a outros. São célebres as suas experiências conceptuais. O estabelecimento, por Galileu, da ideia de que os corpos mais pesados caem tão depressa como os leves da mesma altura não podia ser o resultado exclusivo da experiência... porque a realização da experiência na época mostraria que não caem assim! Mas também não duvidamos que Galileu tenha usado o plano inclinado. Pensamos que se envolveu numa interacção dialéctica entre a razão e a experiência, entre a ideia e o facto. Entrou em linha de conta com a ideia deduzida matematicamente de que o comprimento de um plano inclinado é a média geométrica entre a respectiva altura e a altura vertical percorrida no mesmo tempo em queda livre e substituiu, deste modo, a vertical pelo plano inclinado. Fez extrapolações do tipo: se a experiência mostra que as leis são as mesmas para diversos ângulos de inclinação do plano, porque haviam as leis de ser diferentes para a queda vertical a que corresponde um ângulo de 90°?

Galileu não apresentou nunca um cálculo da aceleração em queda livre partindo da situação limite no plano inclinado, mas, numa carta a Baliani, explicou como tal era possível de fazer (Cohen, 1988, pp. 126 a 128).

Não há dúvida, portanto, que Galileu esteve sempre envolvido no campo da teoria e no campo da experiência, como, afinal, qualquer físico, seja ele teórico ou experimental.

Toda a Física vive da teoria e da experiência, e não pode prescindir de qualquer delas.

Concordamos com Cohen quando afirma que *"o que foi original em Galileu e revolucionário nas suas implicações foi a descoberta das leis da queda dos corpos e a introdução de um método que combina a dedução lógica, a análise matemática e a experiência"* (1988, p.131).

O novo espírito científico, que iniciou a matematização sistemática do Universo, foi capaz de desenvolver um esforço gigantesco de abstracção matemática, de idealização. Mas, como espírito dialéctico que é, encerra em si mesmo uma confrontação com o seu contrário: o espírito não científico. A contradição inerente ao espírito científico, a luta travada com o seu contrário, que o mesmo é dizer, com os preconceitos e os dogmas, autênticas barreiras ao pensamento, é apanágio do espírito científico. A história do pensamento dá-nos sobejos testemunhos disso. O grande cientista, revolucionário em certo momento, foi preconceituoso noutra altura...(41).

Esse **novo espírito científico**, essa chama surgida com Copérnico, Kepler, Galileu, Descartes, Newton e outros, e que felizmente nunca mais se apagou, possui, entre outras, as seguintes *características*:

- uma profunda convicção de que o Universo é inteligível em termos matemáticos;

- a não consideração, para efeitos científicos, dos factos que os conhecimentos matemáticos não permitem matematizar;
- uma associação às imagens sensoriais, tanto quanto possível fiel, de uma linguagem simbólica característica da matemática;
- uma notável intuição, uma capacidade de «ver na escuridão» e boa capacidade de raciocínio hipotético-dedutivo que permitam formular hipóteses válidas acerca dos resultados das experiências, conhecidas e futuras, e resolver os problemas que os dados da experiência vão proporcionando;
- uma recolha de dados objectivos em condições de observação e experimentação quase sempre difíceis;
- um controlo de erros e incertezas na recolha de dados;
- a capacidade de sintetizar e analisar criticamente as situações, de interpolar e de extrapolar de modo sensato;
- e por fim, mas não por último, uma capacidade psicológica de libertação de preconceitos.

Quem se debruçar sobre a história da evolução das ideias em Física verificará a existência de uma dialéctica inerente ao conhecimento físico. O estabelecimento de cada uma das grandes ideias físicas actuais tem um percurso histórico rico em contradições internas e em confrontações de ideias contrárias. Nota-se um **autodinamismo** no processo, um **desenvolvimento em espiral**, em que as novas ideias ampliam as anteriores porque nascem de sínteses dialécticas entre elas.

Na *nota 42* é apresentado, a título de exemplo, um resumo da evolução das ideias que conduziram à Teoria da Relatividade Restrita. Cremos que esse exemplo ilustra bem toda a dialéctica entre as ideias teóricas e os dados da experiência que está envolvida no processo do conhecimento.

No caso da energia, a dialéctica que está inerente à evolução desse conceito revela-se bem cedo, quando se confrontam as concepções do *calor-substância* e do *calor-movimento*. Está patente quando as *previsões teóricas* de Carnot e de Mayer se confrontam com as *experiências* de Joule, de Colding, de Hirn, etc. Está presente quando Clausius *reconcilia* os trabalhos de Carnot e Joule. Aceitava deste a teoria mecânica do calor e a interconvertibilidade de calor em trabalho, mas conservava a parte da teoria de Carnot que exige que por si só (sem compensação de energia) o calor passe *apenas* de uma temperatura mais alta para outra mais baixa. No fundo, é a *síntese* entre duas ideias inicialmente contraditórias, a conservação da energia e a sua degradação. Essa contradição está patente no trabalho de Carnot, porque trabalhou com a teoria do calórico.

É frequente ainda hoje cair-se no erro epistemológico de considerar que os conceitos e as teorias preexistem e são descobertos pelos cientistas. E contam-se muitas histórias de descobertas por acaso que são autênticos mitos.

Conta-se, por exemplo, que **Oersted** estava a dar uma lição e, acidentalmente, colocou uma agulha magnética perto de um circuito e a agulha desviou-se, e que assim fez a chamada «*descoberta fundamental do electromagnetismo*».

Não é nada disto que sucedeu, conforme se depreende da leitura da comunicação de Oersted aos «*Annals of Philosophy*». Pelo contrário, Oersted refere as tentativas de “*celebrados filósofos*” para mostrarem uma relação entre o magnetismo e a electricidade, e deixa transparecer muito claramente que foi a razão que guiou a experiência e não ao contrário. E resolveu associar-se a um amigo (cujo nome refere) e repetir essas anteriores tentativas, recorrendo a uma “*bateria galvânica mais poderosa*” (Frankzen, 1981, p. 46).

Não pretendemos concluir que Oersted fosse um racionalista ou um empirista. Ele era, acima de tudo, um cientista. O que estamos é a rebater uma visão empirista da sua fundamental descoberta, que nos parece absolutamente despropositada.

Até agora, apresentámos argumentos históricos para fundamentar o princípio de que a razão e a experiência estão envolvidas dialécticamente no conhecimento. Chegou a altura de apresentarmos outro tipo de argumentos - estes do foro psicológico.

O conhecimento é um processo e não um facto consumado. Envolve uma componente intuitiva, imediata, que assenta "*no mais profundo da estrutura psíquica do homem*" (Hessen, p. 123), mas recorre também a uma componente não intuitiva, mediata, analítica e sintética, discursiva, assente no raciocínio lógico.

O processo do conhecimento baseia-se numa percepção dos objectos, mas não exclusivamente nela. Como diz **Piaget** (1986, p. 89), "*não descobrimos as propriedades de um objecto senão acrescentando qualquer coisa à percepção - precisamente um conjunto de quadros lógico-matemáticos que engloba classificações, ordenações, funções, etc., sem os quais não seriam possíveis as leituras perceptivas*".

E mais: nestas leituras perceptivas interfere não apenas a estrutura cognitiva do ser cognoscente, mas também a sua estrutura afectiva e volitiva. Pensa-se hoje que as ideias prévias que o ser cognoscente possui (os seus *subsunçores*, para utilizar um termo ausubeliano), os seus sentimentos, as suas emoções, e a sua vontade de conhecer são aspectos decisivos no acto cognitivo.

A psicologia do pensamento "*demonstrou que além dos conteúdos da consciência intuitivos e sensíveis há outros não intuitivos e intelectuais (...), que até nas mais simples percepções está contido um pensamento*" (Hessen, 1987, p. 80) - o que, só por si, rebate o empirismo.

Por outro lado, as teses fundamentais do racionalismo também não resistem à moderna psicologia cognitiva, pois não há qualquer prova da existência de ideias inatas no pensamento ou de quaisquer ideias originárias em fontes transcendentais, nem é certa a possibilidade de construir o nosso conhecimento a partir de princípios racionalmente aceites, e muito menos está garantida a correspondência entre a ordem do pensamento e a ordem da realidade.

Sabe-se hoje que somos dotados de um sistema nervoso bastante plástico no modo como reage às condições do meio exterior. O nosso cérebro contém cerca de 50 milhares de milhões de unidades celulares -os *neurónios* - organizadas em rede e já se conhece o mecanismo de propagação da informação ao longo da rede neuronal do cérebro (Fischbach, 1992, pp. 24-33).

A diversidade histológica tem permitido assinalar à superfície do córtex cerebral, como num mapa, áreas determinadas correspondendo, em grande medida, a uma distribuição de funções (43).

É fascinante pensar que as ideias, as correctas e as incorrectas, que aqui produzimos, nascem da actividade colectiva de todas as regiões do nosso cérebro, actividade essa baseada em impulsos nervosos (os potenciais de acção) a moverem-se numa rede neuronal. Por que razão umas vezes essa actividade funciona bem e outras mal? Por que motivo umas vezes nos conduz a ideias aceitáveis e outras vezes a ideias destituídas de senso?

Ainda se sabe pouco para responder a questões como esta. Mas, hoje em dia, investiga-se afincadamente no sentido de vir futuramente a descrever a experiência subjectiva de cada ser humano numa linguagem neurofisiológica. Está-se ainda muito longe de alcançar esse objectivo, mas, apesar das dificuldades inerentes a um tal campo de investigação, já é possível avançar com certos princípios do funcionamento do cérebro, com alguma fundamentação (44).

Os conhecimentos das neurociências apontam para uma confirmação de que **no processo do conhecimento estão envolvidas componentes racionais ou ideias e componentes empíricas ou estímulos do mundo exterior**. Veremos a propósito do problema da essência do conhecimento que alguns dos princípios das neurociências são coerentes com um modelo construtivista da aprendizagem (Anderson, 1992, pp. 1037-1058). No fundo vêm confirmar a «nata» da Psicologia do nosso século, cujo pai é Piaget.

Piaget defendia que o conhecimento físico de um objecto é um conhecimento experimental, mas não pode considerar-se empiricamente puro, desligado de qualquer organização lógico-matemática. Defendia também (1987) que há uma homogeneidade entre a evolução histórica das ideias e a evolução das ideias na mente humana, tese esta que apoiamos e procuraremos fundamentar posteriormente.

Na linha do pensamento de Piaget, tentámos mostrar que no conhecimento do mundo físico está envolvida uma dialéctica entre as ideias e os dados empíricos. Assim sucedeu na história e assim parece que deverá suceder na mente humana. **O conhecimento de um objecto resulta de uma síntese entre as ideias do sujeito e as propriedades empiricamente evidenciadas pelo objecto.**

Esta tese levanta alguns problemas de que estamos conscientes. Se o conhecimento físico de um objecto pressupõe ideias prévias, como é que a criança recém-nascida está em condições de produzir os seus conhecimentos? Como é que surgem no recém-nascido os primeiros conceitos, aqueles que vão servir de âncora aos conceitos posteriores de modo a poder construir, de modo substantivo, as suas primeiras representações do mundo?

Não há provas de que as ideias sejam transmitidas por hereditariedade. A hipótese de que existem no ser humano ideias *a priori* não é hoje sustentável. Acreditamos que o recém-nascido *inventa* os primeiros conceitos por um processo de tentativa e

erro, em que a imitação dos adultos desempenha um papel importante. A criança habitua-se a reconhecer regularidades nos objectos que a cercam e nos acontecimentos de que se apercebe. Habitua-se a usar designações para essas regularidades (mamã, papá, etc.). Este reconhecimento de regularidades e o uso de designações para elas é um tipo de aprendizagem conhecido em Psicologia por **formação de conceitos**.

A partir do momento em que os primeiros conceitos *subsunçores* vão fazendo parte da estrutura cognitiva da criança, esses conceitos vão-se confrontando sucessivamente com novos dados provenientes da experiência e da transmissão cultural. Os conceitos da criança vão entrando em conflito com esses novos dados empíricos, e as ideias vão evoluindo de modo supostamente adaptado a esses novos dados. Tal como afirma **von Glaserfield** (1983, p. 51), “*o que determina o valor das estruturas conceptuais é a sua adequação experimental, em que medida é boa a sua adaptação à experiência, a sua viabilidade como meio de resolver problemas, de entre os quais, o problema sempre em aberto da organização consistente do que chamamos compreensão. Os factos são obra nossa e o nosso meio de vivermos as experiências*”.

Em suma:

Cada sujeito vai construindo uma síntese entre as suas ideias acerca do mundo e as novas vivências, as novas experiências por que vai passando nesse mundo, isto é, acontece uma **síntese cognitiva subjectual**, entre o sujeito e a experiência vivida com o objecto. Mas, a respeito da natureza desta interacção sujeito-objecto, das características e validade do conhecimento que dela resulta, debruçar-nos-emos mais pormenorizadamente nas secções seguintes.

3.7. O problema da essência do conhecimento

Vamos agora centrar-nos num problema fulcral do conhecimento científico: o da sua **essência**. O conhecimento científico envolve uma relação entre o **sujeito** que conhece e o **objecto** do conhecimento. *Como se desenvolve esta relação? Qual é o factor determinante nesta relação? O sujeito limita-se a um papel passivo ou activo?*

Vamos, no contexto que escolhemos, questionar-nos acerca do que é, de facto, o conhecimento físico da realidade exterior. Questões como a das formas que o conhecimento do mundo físico assume, a metodologia e a validade desse conhecimento, e bem assim o que o distingue, como conhecimento científico, do que não é científico, serão debatidas mais tarde.

Como estamos a produzir um trabalho de índole científica, não iremos envolver-nos em qualquer tipo de solução teológica deste problema. Vamos limitar-nos ao problema da *inteligência humana*, porque o nosso objectivo não é discutir se uma Inteligência superior, um Sujeito cognoscente absoluto, uma Ideia, criou ou não o mundo e, portanto, é anterior a ele. A este respeito, a nossa posição é modesta mas clara: estamos a fazer uma reflexão sobre o conhecimento das ciências físicas. As ciências físicas são ciências de transformação e não de criação. O problema da criação do mundo está fora do seu âmbito. A Física apenas debate o problema da sua evolução, a partir do *Big Bang*. O problema da causa do *Big Bang*, ou de outros *big bangs* que porventura tenham existido, não é (por agora...) um problema científico nem epistemológico (45).

Perante o problema da essência do conhecimento, as duas grandes correntes opostas são o *realismo* e o *idealismo*. Tal como procedemos relativamente aos outros dois problemas, vamos começar por passar em revista a história destas duas correntes.

3.7.1 O realismo

O realismo, quando encarado de um modo extremista, é a posição epistemológica segundo a qual há objectos reais absolutamente independentes do sujeito cognoscente, sendo este capaz de conhecer esses objectos tal como eles são na realidade. Este **realismo ingénuo** é a posição de quem nunca reflectiu no acto de conhecer, particularmente nas suas facetas psicológica, lógica e ontológica. O realista ingénuo não tem em conta o problema do sujeito cognoscente e do papel que este desempenha no conhecimento. Acredita ingenuamente que o conteúdo da percepção de um objecto se identifica em absoluto com o objecto. Pensa que a representação que faz de um determinado fenómeno é uma imagem perfeita, uma «cópia» autêntica, desse mesmo fenómeno.

Os primeiros filósofos gregos eram realistas ingénuos, acreditavam na existência de uma realidade independente do sujeito e procuravam mesmo descobrir os elementos naturais que constituem a verdadeira essência (ou natureza última) dessa realidade.

Os **atomistas** Leucipo, Demócrito e Epicuro eram realistas que acreditavam na existência de uma realidade material - os átomos, movendo-se caoticamente no vazio.

Embora materialistas, não se pode considerar que os atomistas fossem realistas ingénuos. Pensavam que há aspectos quantitativos nos corpos, como, por exemplo, a forma e o volume, que dependem exactamente do número e tipo de átomos, mas que determinados aspectos qualitativos, como é o caso da cor e do sabor, já dependem também do modo como o sujeito cognoscente reage perante a realidade material. Trata-se, portanto, já de um **realismo crítico**, que viria mais tarde a influenciar todo o desenvolvimento da Ciência, como veremos.

Aristóteles herdou essa tradição realista, situando a realidade nos seres individuais: nestes, uma determinada «forma»* encontra-se intrinsecamente ligada a uma determinada «matéria»*.

O estagirita nunca acreditou no atomismo e não era um realista crítico como Demócrito. Mas também não era um realista ingénuo, porque, ao contrário deste, distinguia o objecto do conteúdo da percepção que temos dele. No entanto, acreditava que o objecto corresponde ao conteúdo da percepção, isto é, ao produto da abstracção efectuada a partir dele. Por isso era o que se designa por um **realista natural** (Hessen, 1987, p. 94 e 95).

Os **nominalistas do século XIV** podem considerar-se **realistas positivistas** e também influenciaram os grandes cientistas do século XVI e XVII. Existem seres que possuem «essências» (ler em termos modernos: propriedades) muito semelhantes (são os chamados seres da mesma espécie). Partindo desse facto, a mente cognoscente formula conceitos universais (por exemplo, os conceitos de mesa, cadeira, gato, etc.) que não passam de nomes que designam objectos da mesma espécie (46).

Grandes fundadores da Ciência Moderna, como **Galileu e Descartes**, **reavivaram o realismo crítico de Demócrito**, considerando verdadeiramente objectivas as propriedades espaço-temporais e quantitativas e relegando para segundo plano as propriedades qualitativas subjectivas. Assim nascia o *mecanicismo*, com a preocupação de reduzir a realidade a objectos e movimentos, onde está subjacente uma visão quantitativa do conhecimento, com uma secundarização de todas as propriedades que não fossem matematizáveis. Esta secundarização das propriedades não quantificáveis, pela Ciência do século XVI e seguintes, não significa que essas propriedades se revistam apenas de aspectos subjectivos. Os cientistas sempre procuraram descobrir nelas elementos objectivos que estivessem por trás da existência dessas propriedades, e a sua secundarização era apenas um reconhecimento da incapacidade momentânea de as quantificar. Do esforço de quantificação de propriedades como a cor de um objecto ou do som que emite dão conta os resultados conseguidos no domínio da colorimetria e da análise acústica dos sons.

O **realismo cartesiano** é um realismo que **tem por base o pensamento, a razão**. “*Cogito ergo sum*” é uma afirmação de existência, da realidade do «ego». O **realismo de Descartes é mecanicista**, pois sustentava que as leis da vida animal são as leis da Mecânica. Sustentava que os animais irracionais são verdadeiras máquinas de carne e osso sujeitas às mesmas leis que as outras máquinas de madeira e ferro.

O homem, esse é um ser superior, porque tem uma alma.

Outra forma de realismo, o **realismo volitivo**, surgiu mais tarde, partindo de uma base de vontade e acção do homem, em vez do pensamento, para justificar a existência. A fórmula agora é “*volo ergo sum*”, que significa que o homem existe porque afirma a todo o momento a sua vontade e acção. E as coisas existem porque resistem à vontade do homem. A parede existe porque resiste à passagem do homem, obrigando-o a contornar a casa para entrar dentro dela.

O realismo está patente em filósofos indutivistas, como **Francis Bacon**, que Politzer considera o “*autêntico pai do materialismo inglês*” (1975, p. 127).

Bacon procurou modificar o objectivo da Ciência, com um reforço do estudo das propriedades físicas, tendo por base uma *lógica de indução*. Em vez de um conhecimento científico teórico, contemplativo, preconizava um conhecimento utilitário do mundo natural, baseado na observação e comparação das propriedades caso a caso.

Com **Locke**, a discriminação entre as qualidades sensíveis objectivas e subjectivas tornou-se perfeitamente clara, com a classificação que efectuou dessas qualidades sensíveis em qualidades primárias e secundárias.

As qualidades primárias possuem carácter objectivo, são autênticas propriedades dos objectos, porque na sua percepção intervêm de modo coordenado vários sentidos. É o caso da quantidade, do volume, da forma, do movimento, etc.

As qualidades secundárias, pelo contrário, possuem carácter subjectivo, existem somente na nossa consciência, não se podem considerar propriedades dos corpos, porque na sua percepção intervém um sentido. São exemplos: a cor, o sabor, o cheiro e a dureza.

No século XVIII, um grupo de filósofos materialistas franceses, dirigidos por Denis **Diderot** (1713-1784), fundaram a «*Encyclopédia*». Diderot, que frequentou dois colégios de jesuítas, tornou-se um admirador dos trabalhos de Bacon e Newton e um filósofo prudente em questões científicas, o que já não acontecia em matéria de religião, onde se mostrava muitas vezes contundente em relação a esta.

A filosofia holística, globalista, profundamente idealista de **Hegel** partia de uma visão dialéctica da Natureza em que **os fenómenos são um «precipitado» de um jogo de relações que lhes estão subjacentes. Cada ser é o produto de um processo contínuo de transformação e mudança.** Mas na filosofia hegeliana “*transparece um pouco por todo o lado uma grande ambiguidade*” (Cordon e Martinez, 1987, p. 207), pelo que originou duas descendências absolutamente opostas: uma idealista e outra materialista.

A via materialista foi explorada pelo filósofo do século passado **Feuerbach**, precursor de Marx, que criticou a filosofia de Hegel por desprezar a importância do mundo sensível, resultando praticamente numa teologia racionalizada.

O materialista Feuerbach considerava que é no mundo material, no mundo que apreendemos através dos sentidos que acabam todas as dúvidas e disputas. A Natureza é que dita as leis e de forma alguma pode ser reduzida ao pensamento. Feuerbach defendia uma **filosofia materialista mecanicista**, na qual **a Natureza é explicada através de causas mecânicas.**

A filosofia de Feuerbach e o progresso científico do século passado (principalmente nos domínios celular, da conservação da energia e da evolução das espécies) esteve na base do materialismo do século passado, particularmente as doutrinas de Karl Marx e Friedrich Engels.

Karl **Marx** criticou o materialismo mecanicista por “*considerar o mundo como uma grande máquina, julgar todas as coisas segundo as leis da ciência que se chama Mecânica. Considerando o movimento como um simples movimento mecânico, pensava-se que os mesmos acontecimentos deviam reproduzir-se continuamente. Via-se o lado máquina das coisas, mas não o lado vivo*” (Politzer, 1975, p. 143).

Para além disso, Marx entendia que o materialismo mecanicista era pouco crítico em relação ao idealismo, ignorava o progresso e desenvolvimento histórico e era demasiado contemplativo, não vendo o papel fundamental do homem na sociedade (47).

Procurando superar estas deficiências do materialismo mecanista, Marx fundou o **marxismo** como teoria económico-sociológica e como prática revolucionária que teve a sua história.

O **materialismo histórico** de Marx viria a originar o **materialismo dialéctico**, designação pela qual é conhecida uma *filosofia materialista da Ciência da Natureza* que influenciou e continua a influenciar o pensamento actual acerca da Ciência.

Enquanto o *materialismo histórico* põe a ênfase no papel do homem como interveniente na história, o *materialismo dialéctico* preocupa-se com uma *dialéctica da natureza material*, infinita no espaço e no tempo, com as suas leis próprias (48).

O **materialismo dialéctico** teve como consequência o surgimento de uma **nova visão do mundo** em que vivemos. Essa visão impôs-se durante muitas décadas e ainda hoje se pode considerar válida em aspectos essenciais, a saber:

1º - É um mundo em mudança autodinâmica permanente, em que nada de *material* é definitivo, absoluto e imutável. Introduzimos a palavra material para não cairmos no relativismo total e absoluto das ideias. Há ideias que a Ciência actual considera com um significado físico absoluto, em termos de sujeito. É o caso, por exemplo, das ideias traduzidas pelos grandes princípios de conservação, ou a ideia da constância da velocidade da luz no vácuo.

2º- É um mundo onde nada está isolado, onde tudo depende de tudo e onde os processos de mudança se encadeiam uns nos outros: um encadeamento não em círculo mas em espiral (49).

3º- As mudanças são uma consequência de interacções ou interpenetrações de tendências opostas ou contrárias. Alguns aspectos dessas tendências contrárias vão permanecer como síntese dialéctica nos novos estados da mudança, enquanto outros aspectos são destruídos (Marquit, 1978, p. 786).

As ideias de Marx e Engels acabaram, porém, por redundar num realismo extremista de muitos materialistas, realismo esse que **Lenine** revela de modo transparente na sua obra «*Materialismo e Empiriocriticismo*». Segundo este **realismo radical**, os sentidos, com o auxílio do progresso científico, podem copiar a realidade material tal como ela é. A matéria é o constituinte último e exclusivo de um mundo independente do sujeito.

Einstein e todos os grandes **físicos causalistas** dos finais do século passado e do nosso século, como Planck, Lorentz, Schrodinger e de Broglie podem considerar-se realistas do ponto de vista ontológico, pois acreditavam na existência de uma realidade objectiva subjacente aos fenómenos, que é o suporte destes, mas de forma alguma perfilhavam ideias realistas radicais como as de Lenine, principalmente no que respeita à interface entre a Ciência e a Sociedade (50). O seu *realismo ontológico* estava associado a um certo *idealismo epistemológico*, isto é, a um reforço da importância da ideia na construção do conhecimento do mundo real (50).

3.7.2 O idealismo

O idealismo pode ser encarado quer num sentido ontológico quer num sentido epistemológico.

Num *sentido ontológico*, o idealismo considera que apenas são reais, verdadeiras, autênticas, as ideias que temos acerca do mundo sensível. É uma posição filosófica que parte de um cepticismo relativamente ao mundo sensível.

Por exemplo, **Platão** considera que apenas as Ideias (do Homem, da Justiça, da Circunferência, do Tetraedro, do Cubo e das demais entidades imateriais, absolutas, imutáveis e universais) são reais e autênticas. O Demiurgo modelou essas Ideias ou essências na matéria o mais perfeitamente possível. E é esse mundo das Ideias, plenamente racional e hierarquicamente organizado, que prevalece sobre o mundo sensível, onde os seres são mutáveis e corruptíveis. É a prioridade ontológica da Ideia (ver nota 46).

Num *sentido epistemológico*, que é o que tem que ver com a relação sujeito-objecto no acto do conhecimento (é o que aqui nos interessa discutir), o idealismo revela-se a antítese do realismo que já abordámos. Os realistas consideram o objecto prioritário em relação ao sujeito, o pensamento como um modo de exprimir uma realidade exterior ao sujeito e que determina esse pensamento. Os idealistas, pelo contrário, consideram que o que é prioritário é o sujeito cognoscente, já que o pensamento é um princípio construtor do conhecimento. Para eles, o ser que conhecemos é construído no acto de conhecer, isto é, consideram que *toda a realidade cognoscível se reduz a perceber ou a ser percebido*.

Uma vez que os idealistas epistemológicos defendem a não existência de uma realidade cognoscível independente da mente do sujeito, na história do pensamento filosófico sobressaiem essencialmente dois grandes tipos de idealistas epistemológicos: os *psicológicos* e os *lógicos*.

Os **idealistas psicológicos** afirmam que toda a realidade cognoscível está encerrada na consciência do sujeito. Por isto mesmo também se designam por **idealistas subjectivos**.

O exemplo historicamente mais sugestivo dos idealistas psicológicos é o filósofo irlandês **Berkeley** (1685-1753), de que já falámos a propósito do primeiro problema. O seu idealismo foi ao ponto extremo de se converter num **imaterialismo** (também chamado **acosmismo**), isto é, na negação da própria existência da matéria subjacente aos objectos.

As ideias de Berkeley foram, como vimos, inspiradas numa tentativa de resposta crítica à parte fraca da filosofia de Locke, empirista como ele, mas realista.

Se as ideias de Berkeley nasceram de um problema subjacente ao sistema de Locke, outras ideias idealistas se basearam num problema inerente ao sistema de Berkeley e que é este: **se não há uma realidade material diferente das ideias que possuímos, de onde provêm estas ideias?**

Berkeley estava convencido que a causa das nossas ideias era Deus. Por isso dizemos que o seu **idealismo**, além de subjectivo ou psicológico, também é **teológico**.

Outros idealistas subjectivos procuraram encontrar outras causas para as nossas ideias, que não teológicas. É o caso dos **empiriocriticistas** como **Avenarius** e **Mach**, a que também já nos referimos. Eram idealistas subjectivos, mas não partiam de qualquer base teológica. Segundo eles, na base das ideias está uma atitude de crítica consciente que cada indivíduo exerce sobre os dados empíricos que absorve do mundo exterior e um profundo respeito pelos factos e não por qualquer autoridade do foro metafísico.

Ao contrário dos *idealistas psicológicos* que vêem numa consciência subjectiva (porque individual de cada sujeito) a causa das ideias que temos acerca do mundo, os *idealistas lógicos* acreditam que a causa das ideias reside numa consciência lógica, global mas humana.

Podemos considerar o filósofo alemão **Hegel** (1770-1831) como o pai do **idealismo lógico** (também chamado **panlogismo**).

O grande objectivo de Hegel era a construção de uma teoria filosófica unitária sobre toda a realidade.

Para isso retomou uma velha ideia de Heraclito de que no mundo tudo é movimento e mudança, nada está isolado, antes tudo depende de tudo. Isto é, a realidade é dialéctica, na medida em que não é fragmentada, não é atómica, é movida por uma contradição intrínseca, constituída por uma oposição permanente de «forças» contrárias.

Mas, ao contrário dos materialistas dialécticos que acreditavam também no mundo dialéctico, mas associavam essa dialéctica à própria matéria, *Hegel considerava que a dialéctica não é inerente à matéria mas às ideias*. O princípio da realidade é, em Hegel, uma Ideia lógica, e *as coisas são seres meramente lógicos, porque se cingem às ideias que deles possuímos com base numa consciência total lógica* (Hessen, 1987, p. 106).

“*A verdade está no todo*” é a frase lapidar da filosofia de Hegel. Esse todo é uma espécie de consciência global, uma Ideia ou Espírito que está na origem das nossas ideias acerca do mundo. A realidade é racional porque redutível, em última instância, a essa consciência, a essa Ideia ou Espírito.

Trata-se de uma filosofia complexa, com ambiguidades e que alguns depois de Hegel procuraram converter numa teologia racionalizada.

Mas a consciência colectiva, com base na qual os idealistas lógicos acreditam construir as ideias acerca do mundo, passou a ser muito mais objectiva depois de Hegel, como sucede, por exemplo, com **Hermann Cohen** e os filósofos da *Escola de Marburgo**.

Essa consciência colectiva passou a ser para muitos a chamada *consciência científica, objectiva e lógica*, porque se manifesta de modo objectivo nas obras científicas com total respeito pela lógica.

Assim, por exemplo, um cientista que porventura não acredite numa realidade subjacente às experiências que realiza com um objecto como o átomo, é livre de acreditar que as ideias que vai construindo sobre o átomo provêm de uma consciência científica acerca do átomo (constando de ideias partilhadas por uma comunidade) e não de qualquer «átomo material» subjacente a essas experiências e origem delas. Um cientista desses é um *idealista lógico ou objectivo* e cremos que alguns dos grandes cientistas da *Escola de Copenhaga* assumiram uma posição como esta ou muito próxima dela.

Numa *símula comparativa*, poderemos dizer que perante um dado objecto do conhecimento:

- o realista vê-o como algo real, uma parte do mundo exterior que conhecemos melhor ou pior;
- o idealista psicológico encara-o como um conteúdo da sua consciência, um produto exclusivo do processo psicológico de apreensão do objecto.
- o idealista lógico olha-o como um simples produto lógico do pensamento, uma construção mental com base em ideias provenientes de uma consciência colectiva.

3.7.3 Posições históricas que procuraram uma superação entre idealismo e realismo

1. O fenomenalismo de Kant

Vimos como Kant produziu uma superação do empirismo e do racionalismo, com base em ideias *a priori* e que, por isso, é conhecida por *apriorismo*.

Pois Kant também criou uma síntese superadora entre o idealismo e o realismo e a essa síntese dá-se o nome de **fenomenalismo**.

O fenomenalismo é a teoria segundo a qual existe um mundo real constituído por «*coisas em si*», mas nós não conhecemos a sua essência, isto é, não conhecemos *o que* as coisas são. Conhecemos apenas *como* são, ou seja como se comportam ou revelam aos nossos sentidos. A *Ciência*, na perspectiva de Kant, é o *estudo dos «fenómenos»* (o que aparece, o que se revela e tal como se revela à nossa consciência) e não dos «*númenos*» (as coisas tal como são em si).

O fenomenalismo é um realismo no sentido em que admite a existência de um mundo exterior, mas é também um idealismo pois limita o conhecimento desse mundo à consciência.

Os fenomenalistas como Kant concordam com os realistas críticos que o mundo objectivo não é como nós o vemos, pois propriedades como a cor, o cheiro, o sabor são subjectivas e não são qualidades intrínsecas dos objectos. Mas os realistas críticos sempre aceitam que há propriedades como a forma, o volume, o movimento que são propriedades autênticas dos objectos, enquanto que os fenomenalistas nem isso aceitam. Tais propriedades estão relacionadas com o espaço e o tempo (o que é o movimento senão uma variação de posição no espaço ocorrida no decurso do tempo?). Ora, Kant considera o *espaço* e o *tempo* como *formas da nossa intuição, produtos da nossa sensibilidade*.

Nós, sujeitos cognoscentes, possuímos formas da intuição e do entendimento *aprioristicamente* instaladas na nossa consciência e, em contacto com o mundo sensível, *ordenamos* as sensações de acordo com essas formas, de um modo inconsciente e involuntário. Assim, nenhuma propriedade se pode considerar um atributo intrínseco dos objectos.

Sintetizando o pensamento de Kant a propósito do problema em questão, temos:

- 1º - O mundo exterior ou *mundo das coisas em si* é *incognoscível*.
- 2º - O nosso conhecimento fica limitado ao *mundo dos fenómenos* ou mundo das coisas tal como nos aparecem e se revelam à nossa consciência.
- 3º - O conhecimento do mundo fenoménico assenta numa *elaboração do material sensível* em relação às *formas a priori* da intuição e do entendimento.

2. A fenomenologia de Husserl

Uma outra tentativa de resolver o problema da essência do conhecimento e, ao mesmo tempo, superar o positivismo reducionista (que pretende reduzir a realidade aos factos) e o psicologismo*, é a **fenomenologia** do filósofo alemão **Husserl** (1859-1938).

A **fenomenologia** pretende captar o sentido total dos fenómenos, isto é, das coisas tal como nos aparecem, de um modo descritivo. Apela para a intuição como forma de apreender directamente o significado dos fenómenos, com base numa **correlação imediata entre o sujeito e o objecto**.

Para Husserl, o problema da realidade ou irrealidade dos dados naturais não se coloca. Os dados são os conteúdos que surgem na consciência, em toda a sua pureza, tal como surgem, não importando se eles provêm prioritariamente do objecto ou do sujeito. Este problema de os dados provirem do mundo exterior ou da consciência do sujeito coloca-se, de modo nítido, no **naturalismo** que desde o tempo dos gregos procura conhecer os fenómenos naturais por abstracção a partir deles. Mas Husserl não reconhece rigor, e, portanto, valor filosófico a qualquer abstracção efectuada a partir da Natureza. O naturalismo é visto por Husserl como a presunção de encarar como realidade aquilo que foi pura e simplesmente abstraído da Natureza, com base num falso valor absoluto da experimentação e da teorização lógico-matemática e onde o problema da prioridade de uma sobre outra se poderá colocar.

Husserl relativiza o valor do chamado método experimental e do raciocínio lógico, considerando-os impotentes para criar um progresso fundado e definitivo da Ciência.

O mesmo filósofo critica, também, a pretensa objectividade que o positivismo atribui à Ciência, ao não ter em conta que as suas «objectividades» são, no fundo, o produto de uma função subjectiva, de uma interacção sujeito-objecto.

3. O construtivismo

A posição kantiana segundo a qual só conhecemos o mundo exterior através das nossas sensações e ideias abriu as portas para uma visão representacional desse mundo exterior. A este respeito, é célebre a seguinte afirmação de Schopenhauer (1788-1860): “*O mundo é a minha representação*” (Durant, p. 309). Esta ideia representacional e idiossincrásica do mundo não fez esmorecer, porém, uma visão da Ciência como representação impessoal e objectiva acerca do Universo. O conhecimento pleno da realidade exterior é-nos inacessível, mas o que o conhecimento científico finalmente descobre acerca dela é um facto indiscutível, e pode ser sempre conhecido e reconhecido como tal (são célebres algumas frases de glorificação e plena confiança na Ciência proferidas no século passado...). Esta **visão da Ciência** era uma visão progressiva, mas ao mesmo tempo **estática**. O conhecimento científico adquirido era encarado como algo congelado e susceptível de ser «servido» do mesmo modo para todo o sempre.

Não se conhece físico algum no século passado que anteviesse, em toda a sua grandiosidade, a revolução científica, esse corte epistemológico que aconteceu no princípio do nosso século com o surgimento da Teoria da Relatividade e da Física Quântica. Pelo contrário, os triunfos da ciência newtoniana tinham sido tantos e tão retumbantes que Karl Pearson, ao escrever a sua «*Gramática da Ciência*» nos finais do século passado, ainda se revelava mais inflexível do que Bacon acerca da positividade do conhecimento científico (Novak, 1992, p. 3.20).

Quer em Bacon, quer em Pearson, o conhecimento verdadeiro resultará de uma observação desapaixonada da Natureza, em que os mesmos acontecimentos e objectos são analisados de modo absolutamente igual por todos os cientistas, e onde não há lugar para diferenças motivadas por factores inerentes ao observador ou ao método de observação.

O surgimento da Teoria da Relatividade e da Física Quântica, já no nosso século, viria a ter profundas consequências no modo de encarar o conhecimento científico.

Uma das primeiras e mais importantes é a substituição da ideia de Ciência-facto pela de **Ciência-processo**, em que a concepção de um conhecimento científico estático deu lugar à concepção de um conhecimento científico **dinâmico**, sempre em devir, sempre em construção e reconstrução.

Para essa mudança epistemológica também contribuiu o trabalho de **Piaget**. Esse conhecido psicólogo aceitou o carácter representacional do conhecimento e encetou uma longa investigação no campo da Psicologia genética, tentando descobrir o modo como evoluem as representações acerca do mundo no ser humano, desde que nasce. A certa altura, Piaget tornou-se um *construtivista* também no campo epistemológico, passando a encarar o conhecimento científico como uma «*realidade viva*» que não se revela apenas pelo seu estudo e grau de desenvolvimento em cada momento, mas, fundamentalmente, pelo modo como foi construído ao longo da história.

Apercebendo-se de quão lenta e difícil é a elaboração das noções físicas mais elementares, como a de espaço, tempo, velocidade ou as diversas conservações, Piaget viu nisso uma possível razão para o atraso no desenvolvimento histórico da Física, Química e restantes ciências experimentais relativamente à ciência puramente lógico-matemática que é a Matemática (Piaget, 1976, p. 21).

Piaget acreditava na existência de um determinado **isomorfismo entre a génese das ideias nos seres humanos e a evolução das ideias ao longo da história da Ciência**. Na secção 3.12 desenvolveremos os argumentos de Piaget e apresentaremos os nossos próprios argumentos a favor desta tese, que será fundamentada com mais exemplos no capítulo 4.

O matemático Evert **Beth**, inicialmente crítico relativamente às ideias epistemológicas de Piaget, acabou por se identificar com elas, considerando como *objectivo legítimo da Epistemologia a explicação do modo como o pensamento do ser humano pode construir a Ciência, enquanto sistema coerente de conhecimentos objectivos* (Piaget e Garcia, 1987, p. 20).

A Psicologia genética de Piaget só conheceu uma grande popularidade nos meios educacionais americanos nos anos 60, altura em que foi «redescoberta» nesse país. Fizeram-se variados estudos tendentes a verificar se o desenvolvimento intelectual dos estudantes americanos obedecia ou não ao esquema proposto por Piaget. E os resultados foram algo decepcionantes. Novak refere-se a alguns desses trabalhos e cita Flavell (um dos maiores conhecedores e divulgadores da teoria de Piaget na América) que substitui a ideia piagetiana de «*metamorfoses cognitivas*» (expressão empregue por Flavell) durante a infância e a adolescência pela de meras «*tendências para o desenvolvimento*» que vão variando, principalmente pelo grau de domínio em cada matéria que o aprendiz vai adquirindo. (Novak, 1992, pp. 2.9 a 2.13). É esta, quanto a nós, a parte fraca da Psicologia genética de Piaget: *o desenvolvimento intelectual é muito menos estereotipado do que cria Piaget, revelando-se profundamente influenciado pela história educativa do ser humano.*

Sabemos hoje que diversos factores educacionais têm grande influência no desenvolvimento intelectual, o que não invalida o oposto, isto é, que o desenvolvimento intelectual de cada criança em cada momento não influencie a sua educação futura.

Para além disso, o acto de conhecer também é influenciado por factores de ordem social, económica e política. É sabido que as condições de vida da mãe, durante a gravidez, bem como as condições de vida da criança após o nascimento, têm grande influência na formação do sistema nervoso da criança, condição importante para a aprendizagem.

As condições das escolas e das turmas, os professores e os *curricula* são também factores decisivos para a aprendizagem.

Nascido no mesmo ano que Piaget (1896), mas falecido prematuramente (com 38 anos), o psicólogo russo Lev **Vygotsky** tinha uma visão diferente da do psicólogo suíço acerca do desenvolvimento intelectual. Essa visão, hoje muito divulgada, manifesta-se claramente no artigo «*Aprendizagem e Desenvolvimento Intelectual na Idade Escolar*», que faz parte do 1º volume da colectânea «*Psicologia e Pedagogia*» (Luria et al., 1991, pp. 31-50).

Nesse artigo, Vygotsky sistematiza as teorias mais importantes referentes à relação entre desenvolvimento e aprendizagem em três categorias: duas destas categorias são perfeitamente contraditórias, já que, ou consideram a independência dos processos de desenvolvimento e de aprendizagem (a teoria de Piaget é incluída nesta categoria), ou sustentam, pelo contrário, que a aprendizagem é que constitui o próprio desenvolvimento; a terceira categoria corresponde às «teorias dualistas» (a teoria de Koffka é apresentada como exemplo), segundo as quais o processo de desenvolvimento é distinto do de aprendizagem, mas acompanha-o estreitamente.

Vygotsky apresenta argumentos contra todas as categorias anteriores e propõe-nos uma alternativa designada por **teoria da área de desenvolvimento potencial**. Segundo esta teoria há dois níveis de desenvolvimento intelectual, um nível de desenvolvimento efectivo e uma área de desenvolvimento potencial.

Quando duas crianças resolvem de igual modo os testes e se verifica que elas têm a mesma idade mental, concluímos que elas estão no mesmo nível de desenvolvimento efectivo. Isto não significa que, após serem submetidas a um ensino com perguntas guia, exemplos e demonstrações, uma delas não possa resolver com mais sucesso provas posteriores. Isto sucede porque uma das crianças apresenta um maior desenvolvimento potencial. A zona do desenvolvimento potencial de uma criança corresponde ao que ela é capaz de realizar com o auxílio dos adultos. Diz respeito não só aos processos de maturação que já se produziram, como também aos processos que estão ocorrendo e que se estão desenvolvendo a cada momento. Sem o conhecimento destes dois níveis fica por conhecer o estado de desenvolvimento mental dos seres humanos. Ora, é precisamente ao nível do desenvolvimento potencial que um ensino bem conduzido poderá contribuir para o desenvolvimento mental e para um maior sucesso futuro quer na escola quer na vida activa. *“Um ensino orientado até uma etapa de desenvolvimento já realizado é ineficaz sob o ponto de vista do desenvolvimento geral da criança, não é capaz de dirigir o processo de desenvolvimento, mas vai atrás dele. A teoria do âmbito do desenvolvimento potencial origina uma fórmula que contradiz exactamente a orientação tradicional: o único bom ensino é o que se adianta ao desenvolvimento”* (Vygotsky, 1991, pp. 45).

Segundo Vygotsky, **a aprendizagem da criança e o seu desenvolvimento intelectual estão directamente ligados mas não se produzem de modo paralelo**. Existe uma dependência complexa entre ambos, sabendo-se que a aprendizagem orienta e estimula processos internos do desenvolvimento cognitivo, que influenciam o ritmo a que ele ocorre.

Iremos ver que esta visão de Vygotsky está mais próxima da epistemologia construtivista moderna do que a teoria de desenvolvimento de Piaget e, talvez por isso, nota-se hoje um recrudescer do interesse nos trabalhos desse psicólogo russo.

Se os trabalhos de Piaget e Vygotsky, no campo da Psicologia, muito contribuíram para realçar a necessidade de se substituir a visão de um saber estático pela ideia de um conhecimento aberto e dinâmico, a filosofia de Gaston **Bachelard** também aponta na mesma linha. Segundo ele muito bem realça, as concepções científicas não surgem independentemente do estado evolutivo do conhecimento, nem podem ser assimiláveis independentemente do quadro conceptual referente a cada época. **Cada nova ideia é um produto da maturação do conhecimento científico-tecnológico de uma época.**

Um contributo notável para o construtivismo fica a dever-se ao psicólogo americano **George Kelly** que, em 1955, escreveu a obra «*The Psychology of Personal Constructs*». Nessa obra, Kelly considera que cada ser humano constrói e reconstrói o seu próprio conhecimento acerca do mundo através de um processo de observação, interpretação, previsão e controlo da realidade. Os psicólogos recorrem muitas vezes a metáforas para traduzir a essência das suas teorias. Kelly faz corresponder à sua teoria construtivista a metáfora «*O Homem-O Cientista*», contrapondo-a à metáfora «*O Homem-A Máquina*» perfeitamente adequada à visão clássica do papel do ser humano na Ciência (Thomaz, 1987).

O construtivismo opõe-se às visões empírico-indutivistas, positivistas e neo-positivistas da Ciência que defendem a existência do conhecimento verdadeiro acerca do mundo alcançável através da análise objectiva dos factos. É também

incompatível com todas as psicologias associacionistas, comportamentalistas, de estímulo-resposta prevalentes até aos anos 70, que consideram a mente humana como uma caixa negra que faz corresponder a um dado *input* sempre o mesmo *output*, e que fundamentalmente se limitam a estudar as relações entre os dados que entram e os que saem.

O triunfo do construtivismo só se tornaria possível, portanto, com a queda do neopositivismo ou empirismo lógico, que ainda era a filosofia da Ciência que dominava nos países anglo-saxónicos em 1960 (Ronald Giere, 1988, p. 22), preocupada apenas com a análise lógica das proposições científicas e não com o modo como a Ciência funciona.

Para melhor fundamentarmos e defendermos o construtivismo, sentimos necessidade de abordar algumas das mais importantes correntes epistemológicas do nosso século. Trata-se de uma abordagem sumária, apenas o bastante para que se tornem patentes as incompatibilidades dessas correntes.

Começemos pelo empirismo lógico, positivismo lógico ou neopositivismo. Para os **empiristas lógicos**, o conhecimento científico é empírico, na medida em que se baseia nos dados sensoriais directos, mas é ao mesmo tempo racional e lógico, pois tem subjacente uma lógica indutiva que fundamenta a validade das inferências científicas retiradas dos dados, permitindo considerá-las perfeitamente racionais e objectivas.

Os empiristas lógicos não tinham ideias exactamente iguais acerca da indução, mas todas essas ideias tinham um denominador comum: **a inferência racional só pode ser justificada com base em categorias lógicas.**

A *lógica indutiva* neopositivista baseia-se no cálculo de probabilidades, que permite atribuir uma probabilidade p (L/e) a cada lei empírica L (por exemplo, a lei «todos os cisnes são brancos») com base numa evidência e (por exemplo, «o cisne A é branco»).

O empirismo lógico começou a perder progressivamente adeptos. Porém, ainda hoje proliferam algumas ideias inspiradas nessa filosofia, que não se enquadram dentro do construtivismo (51). Entre essas ideias, podemos referir, pela sua importância, duas:

- a de que **as teorias científicas são essencialmente conjuntos de afirmações objectivas;**
- a de que **a Ciência é a procura da verdade acerca da Natureza.**

Estas ideias foram também sustentadas por **Popper**, para quem as teorias da Ciência devem ser aceites como verdadeiras enquanto não se provar que são falsas.

É sabido que *Popper nunca acreditou na lógica indutiva* e, como tal, acabou por se distanciar do empirismo lógico. Refere-o de modo muito claro ao discutir o problema da indução na sua «*Lógica da Pesquisa Científica*» (1993, pp. 27 a 31).

O argumento de Popper contra a lógica indutiva é conhecido: por maior que seja o número de casos em que se verifique uma lei empírica (por exemplo, que «todos os cisnes são brancos»), jamais teremos provada a veracidade de tal lei. Mas basta que se constate um caso em que a lei não se verifique («que um cisne não é branco») para refutarmos a lei. Reside aqui a base do seu célebre **princípio da falsificabilidade**. A Ciência progride, não através da verificabilidade das hipóteses, que assim se tornam verdadeiras, mas através da rejeição das hipóteses insustentáveis, por se verificarem serem falsas.

Popper distinguia entre a *Psicologia do conhecimento*, que lida com o problema do que percebemos, do que é ou não é um facto empírico, e a *Lógica do conhecimento* que tem como objectivo a estrutura das relações lógicas, não se preocupando com o modo como as novas hipóteses são geradas, mas apenas com o modo como elas são testadas.

Problemas como o do papel da criatividade na construção das hipóteses, das pré-concepções na construção das teorias e outros não foram nunca discutidos por Popper, mas são fundamentais na filosofia do construtivismo humano.

As ideias de Popper mudaram bastante na sua última fase, e, na sua autobiografia recente, ele não hesita em considerar que “*o positivismo lógico está morto*” (1982, p. 88). Consideramos que ele não está completamente morto mas apenas moribundo, pois permanece nas salas de aula o que Novak designa por um *positivismo subtil* (1992, p. 3.34), bem patente no modo como muitos professores contemporâneos continuam a considerar a Ciência, na prática de avaliação dos alunos, etc.

Um grande avanço na Epistemologia foi proporcionado pelo trabalho de Thomas Kuhn. Para este epistemólogo e historiador da Ciência, **as teorias científicas não são aceites através de uma justificação lógica, elas são aceites enquanto se enquadram no paradigma reinante e são rejeitadas com base na competição entre teorias rivais.**

O *paradigma* tem, em Kuhn, diversos significados. Tal como o encaramos, o paradigma kuhniano numa área científica é um *conjunto de pressupostos que constituem o acordo reinante entre os cientistas dessa área*. Constitui, pois, uma base para a pesquisa do dia a dia característica da *ciência normal** (efectuar observações, conduzir experiências, como Kuhn diz, “*resolver puzzles*”). É como que um modelo que é aceite e seguido por todos enquanto não surge um novo paradigma através da *ciência revolucionária**, obra de uma elite de cientistas que inventaram esse novo paradigma para resolver os problemas e incoerências surgidos com o anterior.

Ao apresentar as diferentes secções da sua obra «*The Structure of Scientific Revolutions*», Kuhn escreve o seguinte: “*A secção XII descreve a competição revolucionária entre os proponentes da velha tradição científica normal e os aderentes da nova tradição (...) A competição entre segmentos da comunidade científica é o único processo histórico que sempre resulta, de facto, na rejeição de uma teoria aceite previamente ou na adopção de uma outra*” (1970, p. 8).

Não vamos aqui alongar-nos na análise da teoria de Kuhn, apesar de ela constituir um marco na Epistemologia. Vamos apenas focar um problema fulcral na sua teoria, o qual tem que ver com a competição entre teorias rivais.

As teorias não têm a pretensão de representar uma dada realidade e não podem ser confrontadas com ela. Devido à ideia kuhniana de *incomensurabilidade* (considerada muito polémica), a competição objectiva entre teorias rivais torna-se impossível (52) . Parece, portanto, não haver caminho possível para fugir ao relativismo, mas, como veremos, tal não corresponde à realidade. O cognitivismo construtivista ensina-nos esse caminho.

A teoria de Kuhn serviu de referente às teorias epistemológicas que se lhe seguiram. Estas foram apresentadas como alternativas à teoria kuhniana e, entre elas, as que despertaram maior atenção foram as de Imre Lakatos e Larry Laudan.

Lakatos considera que a teoria de Kuhn falha na questão da demarcação entre Ciência e não-Ciência. E entende que o critério da falsificabilidade de Popper é demasiado forte. Segundo ele, todas as teorias vivem num “*oceano de anomalias*” e, a ter-se em consideração o referido critério da falsificabilidade, todas seriam rejeitadas. Por outro lado, Lakatos admite uma tese anterior segundo a qual há sempre possibilidade de evitar a falsificabilidade de uma teoria com a introdução de hipóteses suplementares *ad hoc*. Então, para não cair no convencionalismo, Lakatos introduz a ideia de *programa de investigação científica (PIC)* como alternativa ao conceito kuhniano de *ciência normal*.

Um *PIC*, segundo Lakatos, consta de “*uma sucessão de teorias*” conjuntamente com regras metodológicas e tem três componentes:

- um *núcleo duro* (“*hard core*”) composto por teorias e leis (conjuntos de afirmações aceites pela comunidade científica com fundamento análogo ao defendido pelos empiristas lógicos) bem como por uma *cinta protectora* (“*protective belt*”) de hipóteses auxiliares;

- uma *heurística positiva*, constituída por um conjunto de regras metodológicas que permitem desenvolver hipóteses auxiliares úteis, orientando o desenvolvimento do programa;
- uma *heurística negativa*, constituída por regras metodológicas que evitam o uso de contra-exemplos susceptíveis de refutar as afirmações do núcleo duro, e que incluem a adição ou subtracção de hipóteses auxiliares.

Tal como Kuhn, Lakatos apoiou-se na história da Mecânica newtoniana para formular a sua teoria epistemológica. Assim, as três leis de Newton e a lei da gravitação universal constituem o núcleo duro da Mecânica newtoniana. Quando surgem anomalias, por exemplo no movimento de um astro, recorre-se a hipóteses auxiliares de modo a que as observações do movimento do astro passem a estar de acordo com o núcleo duro dessa Mecânica.

Os PIC podem ser *progressivos* ou *em degenerescência*. São *progressivos* quando a sua heurística positiva consegue gerar previsões confirmadas pela experiência. Estão *em degenerescência* quando se limitam a uma acomodação às novas descobertas que se vão efectuando por meio de hipóteses auxiliares sem serem capazes de efectuar previsões acerca de novas descobertas.

A competição, na Ciência, dá-se entre os programas de investigação científica. A revolução paradigmática de Kuhn não é mais do que a substituição de um PIC em degenerescência por um outro que se revela progressivo.

Lakatos introduziu o termo “*metametodologia*” para designar o método “*quase empírico*” através do qual os PIC são considerados progressivos ou em degenerescência. Este conceito tem-se revelado polémico e muito criticado por conduzir ao relativismo.

A oposição total entre as teorias epistemológicas de Lakatos e Popper atinge-se a respeito do papel das confirmações e refutações. *Enquanto para Popper as confirmações de uma teoria não existem, o que contam são as refutações, para Lakatos são as confirmações que se revelam importantes.*

Uma outra teoria epistemológica alternativa à de Kuhn é a de **Laudan**. Na sua obra «*Progress and Its Problems*» (1977) desenvolveu uma visão da Ciência que dá relevância à *tradição de pesquisa* (tal como Kuhn e Lakatos), mas cujo objectivo fundamental é a *resolução de problemas* que vão surgindo no progresso da Ciência (Lakatos atribuiu pouca importância à *resolução de problemas*).

Para Laudan há dois grandes *tipos de problemas* que se levantam a uma teoria científica:

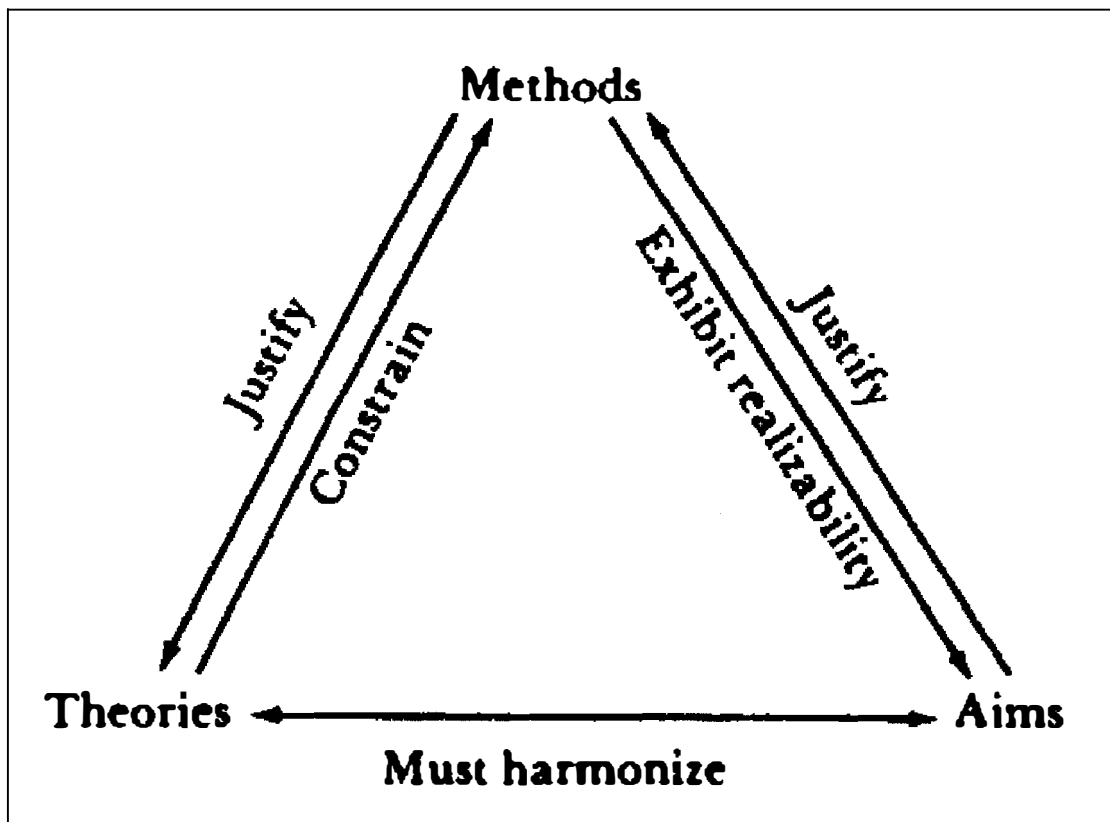
- os *empíricos*, gerados por descobertas experimentais que não encontram explicação na forma actual da teoria;
- os *conceptuais*, que podem ser internos, isto é, têm que ver com a consistência interna da teoria, ou externos, dizendo respeito, por exemplo, à confrontação com teorias rivais ou a conflitos com pontos de vista metafísicos.

O progresso do conhecimento científico resulta da actividade permanente de resolução de problemas que se vão levantando. A tradição de pesquisa que prevalece é aquela que tem maior taxa de eficiência na resolução de problemas.

Esta visão da Ciência, enquanto construção social, é importante porque ela é paralela à visão da Psicologia genética acerca da evolução do conhecimento individual, em que o papel da resolução de problemas é realçado.

Há determinadas crenças acerca da Ciência para as quais há que procurar uma causa. Para Laudan, sempre que algo em que se acredita pode ser explicado com base em argumentos históricos adequados, não é necessário recorrer-se a explicações baseadas em causas sociais. Ele estabelece, deste modo, uma separação funcional entre a História e a Sociologia do conhecimento (1977, p. 202).

Em 1984, Laudan publicou a obra «*Science and Values*». Nela apresentou um modelo não hierárquico da Ciência, o chamado *modelo reticulado* de Laudan, em que teoria, metodologia e objectivos interactuam entre si:



Modelo de Laudan (1984, p. 63)

Enquanto que no modelo de Kuhn, métodos, objectivos e teorias estão empacotados no mesmo conceito de paradigma, Laudan separa claramente estas três componentes.

Quer os empiristas lógicos quer Popper encaram a escolha de objectivos de uma forma meramente convencional, o que não sucede com Laudan para quem os objectivos dependem dos métodos e das teorias.

Cada tríada *objectivos-métodos-teorias* particular corresponde a um paradigma global de Kuhn, mas a passagem de um paradigma para outro é feita por uma série de passos racionais e não de uma forma revolucionária e global.

O modelo do epistemólogo americano Gowin, que estudámos em profundidade, corresponde a uma visão bem mais «rendilhada» do modo como os diversos elementos da Ciência interactuam entre si. Esse modelo adequa-se exemplarmente à concepção de Ciência que defendemos, e cujas características explicitamos neste capítulo.

Todas as teorias que acabámos de analisar rejeitam o realismo científico. Mas, Laudan, ao contrário de Kuhn e Lakatos, defende um *realismo semântico*, isto é, *as hipóteses teóricas podem referir-se a entidades reais e, como tal, serem literalmente verdadeiras ou falsas*. O que Laudan rejeita é apenas o *realismo epistemológico*, isto é, a certeza de que as teorias científicas são verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras.

Laudan rejeita o argumento muitas vezes invocado de que o sucesso explícito de uma teoria sustenta a sua veracidade. Ele apresenta diversos exemplos de teorias que tiveram sucesso durante largos períodos da história da Ciência e depois acabaram por ser rejeitadas.

A grande tese por que se batem os filósofos realistas actuais não é, evidentemente, o *realismo científico* no sentido absoluto (isto é, a ideia de que as teorias científicas actuais espelham verdadeiramente a realidade), mas tão só o chamado *realismo convergente*: as teorias são cada vez melhores aproximações à verdade. Uma teoria é uma aproximação à verdade e a que se lhe segue é-o ainda mais. Laudan rejeita este realismo ao considerar exemplos como as teorias do éter que estavam completamente erradas, já que o éter pura e simplesmente não existe; não podem, pois, essas teorias ser consideradas aproximações à verdade.

O filósofo **Van Fraassen**, que escreveu a conhecida obra «*The Scientific Image*», em 1980, mantém o anti-realismo dos seus antecessores que se arrasta desde o empirismo lógico. Defende o empirismo, mas um **empirismo construtivista** que elimina os excessos positivistas dos empiristas lógicos, rejeita a lógica indutiva e desvaloriza a análise lógica da explicação científica.

Van Fraassen desenvolve a distinção que os empiristas lógicos fazem entre termos observacionais e teóricos (53) e considera duas partes numa teoria científica: uma *subestrutura empírica* e uma *superestrutura teórica*.

A superestrutura teórica pode representar aspectos do mundo real. *Os termos teóricos e as afirmações que essa estrutura envolve podem referir-se ao mundo real e serem considerados verdadeiros ou falsos. Porém, a Ciência não pode garantir que haja uma correspondência entre a superestrutura teórica e o mundo.*

A subestrutura empírica diz respeito aos fenómenos observáveis. A Ciência tem que se preocupar que haja uma associação entre a subestrutura empírica e os fenómenos observáveis. Se tal suceder, a *teoria científica* diz-se *empiricamente adequada*.

Van Fraassen distingue o empirismo construtivista do realismo recorrendo à diferença entre “*acreditar*” e “*aceitar*” (1980, p. 69). Afirma haver duas atitudes epistemológicas que podemos tomar face a uma teoria: uma delas é dizer que ela é verdadeira, dispõe de um modelo que é uma réplica fiel da realidade, e pedir que acreditem nela. Outra atitude é afirmar que a teoria é empiricamente adequada e pedir simplesmente que a aceitem.

O empirismo construtivista defende esta segunda atitude. Entende que **a Ciência não aspira atingir a verdade acerca do mundo, mas apenas construir teorias empiricamente adequadas.**

Facilmente se compreende que, ao abdicar do objectivo da verdade, o empirismo construtivista tenta livrar a Ciência da metafísica, afinal uma das grandes metas do empirismo lógico.

A diferença entre o empirismo lógico e o empirismo construtivista torna-se agora transparente:

- O *empirismo lógico* ou *neopositivismo* recusa, como sabemos, tudo o que está para além do observável. Não reconhece uma modalidade objectiva na Natureza escondida atrás dos fenómenos observáveis. A Ciência cinge-se a esquemas lógicos, considerados verdadeiros, que se baseiam nos dados recolhidos da experiência. Procurar afirmações verdadeiras respeitantes a uma realidade para além do observável não é um objectivo da Ciência.
- O *empirismo construtivista* encara a Ciência como uma construção de modelos e testagem desses modelos para aquilatar da sua adequação empírica. A procura da verdade acerca do mundo não é um objectivo da Ciência.

Von Glasersfeld estabeleceu a distinção entre *construtivistas radicais* e *construtivistas triviais*. Ambos, como construtivistas que são, acreditam numa realidade exterior e que a Ciência vai construindo representações da mesma. Porém:

- Os **construtivistas radicais** consideram a Ciência incapaz de saber se as representações que vai construindo acerca da realidade exterior se estão ou não a aproximar da verdade acerca dessa realidade.
- Os **construtivistas triviais** estão convencidos que as representações que a Ciência constrói da realidade exterior se vão aproximando tanto mais de uma descrição verdadeira e autêntica dessa realidade quanto mais progride o conhecimento científico da mesma.

Os construtivistas radicais rejeitam a ideia de que há um único meio verdadeiro de ver o mundo e de que há um limite para a evolução dos modelos explicativos que a Ciência vai construindo, considerando impossível comparar com toda a objectividade as nossas representações do mundo exterior com este e garantir que essas representações se aproximam da realidade do mundo exterior.

Rosalind Driver (1988, p. 133) cita o construtivista Johnson-Laird que afirma:

“Os seres humanos não apreendem o mundo directamente. Possuem tão só uma representação interna dele, porque a percepção é a construção de um modelo do mundo. São incapazes de comparar esta representação perceptiva directamente com o mundo—é o seu mundo.” Concluimos, assim, que Johnson-Laird é um construtivista radical.

Finda esta digressão histórica envolvendo a Filosofia da Ciência, em que fomos conduzidos ao paradigma actual do construtivismo humano, vamos agora fazer uma breve referência à Sociologia da Ciência. Esta, como não podia deixar de ser, também tem contribuído para a mudança do pensamento acerca da Ciência, mormente a Sociologia cognitiva da *Escola de Edimburgo** (54).

Inspirada na teoria de Kuhn (que contém claramente aspectos sociológicos intuitivos), a Escola de Edimburgo fortaleceu a ideia kuhniana de uma *filosofia científica onde não há lugar para uma separação entre a lógica, a racionalidade, os aspectos psicológicos e os aspectos sociológicos da Ciência*.

A Ciência é encarada como um *corpo de conhecimentos socialmente construído* com base em “*negociações*” dentro da comunidade científica. Os cientistas negociam para defender as suas teses e fazem-no do mais variado modo (inclusivé no acto de publicarem as suas ideias em revistas científicas, condição *sine qua non* para serem conhecidas e desenvolvidas).

A *Escola de Edimburgo* não rejeita o relativismo na Ciência, antes recorre a ele para uma compreensão científica de certas formas do conhecimento (Antropologia, Sociologia, Psicologia cognitiva, por exemplo).

Alguns sociólogos levam longe de mais este relativismo científico quando defendem, como Collins o fez (1981, p.3), que “*o mundo natural tem um papel pequeno ou nulo na construção do conhecimento científico*”.

Uma última referência, antes de avançarmos para a nossa análise do construtivismo na sua forma actual, diz respeito à filosofia de **Stephen Toulmin**, expressa no seu livro «*The Collective Use and Evolution of Concepts*», publicado em 1972 (constitui o primeiro volume de uma obra que se propôs escrever sobre a compreensão humana, mas que, infelizmente, não terminou).

Nesse volume, Toulmin refere que a demonstração da racionalidade humana está patente no modo como ele muda as suas ideias, os seus procedimentos, os seus conceitos. Não são apenas os organismos que evoluem, os conceitos humanos também vão mudando. A evolução do conceito de evolução das espécies, desde Lamarck a Darwin, passando por Herbert Muller, até à actualidade, é um bom exemplo de **evolução conceptual**.

É sabido que, na evolução dos organismos, algumas espécies sobrevivem em determinados *nichos ecológicos*, vindo a extinguir-se quando as condições ecológicas desses nichos se modificam. De modo paralelo, Toulmin afirma que um dado conceito pode encontrar um *nicho cultural* que faz com que ele sobreviva muito para além da sua extinção na cultura que o originou (55).

Segundo Toulmin, os mais diversos aspectos da Natureza evoluem, sejam eles os organismos ou as ideias dos seres humanos. A obra de Toulmin proporciona-nos uma visão da compreensão humana e da sua evolução na base da mudança conceptual e contribui decisivamente para uma rotura com a tradição positivista que encara a Ciência como a procura de verdades fixas. As revoluções paradigmáticas de Kuhn são, na perspectiva de Toulmin, o resultado de muitas pequenas mudanças conceptuais. As novas ideias só vingam quando encontram um nicho cultural adequado.

Como se dá a culturação dos jovens ingressados numa área científica? Começam por conhecer e aplicar os conceitos e métodos que se encontram instalados na comunidade científica, e só mais tarde, gradualmente, vão injectando os seus próprios conceitos. Estes só são aceites quando se revelarem vantajosos em relação aos anteriores.

3.8. A Física é uma construção humana e dialéctica resultante da interacção entre o sujeito e o objecto, entre o pensamento e a acção - 3º Princípio

Quem confrontar o prefácio da obra «*Conceitos fundamentais de Matemática*» de Bento de Jesus **Caraça** com a introdução de Jean **Piaget** à Epistemologia genética, primeiro capítulo do seu conhecido livro «*Psicologia e Epistemologia*», verificará como esses dois homens, com formações tão distintas um do outro, e tão distantes no espaço, se situavam de igual modo face a duas visões distintas do conhecimento científico:

- O **conhecimento-facto**, em que a Ciência é encarada como um todo harmonioso e consumado, que, embora incompleto, não revela quaisquer contradições. "*Aquilo que está sabido está sabido e pode estudar-se estaticamente*" (Piaget, 1976, p. 11).
- O **conhecimento-processo**, em que a Ciência se revela como um corpo dinâmico em desenvolvimento progressivo, "*um organismo vivo, impregnado de condição humana, com as suas forças e as suas fraquezas e subordinado às grandes necessidades do homem na sua luta pelo entendimento e pela libertação.*" (Caraça, 1975, p. XIII).

Esta segunda visão da Ciência é a que ambos consideram válida por diferentes razões.

Hoje há motivos mais que suficientes, quer de índole histórica, quer de índole psicológica, para acreditar que o conhecimento é, *in integrum*, um *processo* em desenvolvimento e não um *facto* consumado. É um processo lento e difícil de construção de representações acerca do mundo. Envolve uma componente intuitiva, imediata, mas também uma componente não intuitiva, mediata, analítica e sintética, discursiva, assente no raciocínio lógico.

Num mundo dialéctico, o conhecimento físico nunca poderá perder de vista a sua integração no conhecimento geral. Porém, razões metodológicas forçaram a Física a «isolar» determinadas partes do mundo exterior para melhor as poder estudar. É um abdicar consciente do conhecimento utópico da totalidade (onde, segundo Hegel, está a verdade) em favor de um conhecimento possível do parcial. Assim, *o conhecimento próprio da Física cinge-se à apreensão do significado de determinados tipos de «objectos»: os fenómenos físicos.*

A apreensão do significado destes fenómenos implica compreender o modo **como** eles acontecem. Dessa apreensão resulta, e isto é importante, uma *alteração significativa da nossa experiência acerca do mundo físico*, e, consequentemente, uma ***modificação das nossas representações acerca desse mundo.***

A Física, apesar de constituir uma compartimentação do saber total, acaba sempre por se debruçar sobre «objectos» mais ou menos complexos. Só depois de conhecer, na sua coerência interna, um *grande número* de fenómenos físicos, de os ter reduzido a determinados princípios simples, e de os ter envolvido num mesmo quadro teórico que relaciona conceitos (e, portanto, ideias) de modo coerente com a observação dos fenómenos, surge alguma convicção de se estar no caminho certo. Esta certeza baseia-se, precisamente, na multiplicidade dos factos examinados, já que a probabilidade de erro é tanto menor quanto mais fenómenos forem abarcados por um mesmo quadro teórico assente num reduzido número de princípios simples e aceite por uma comunidade científica.

Intencionalmente falámos nos fenómenos como «objectos» por duas razões:

Em primeiro lugar, porque, na realidade, o *objectivo* legítimo da Física é o estudo dos fenómenos físicos (que acontecem em sistemas mais ou menos complexos). É a partir deles, ou de simulações deles, que são recolhidos dados tanto quanto possível objectivos (dentro da subjectividade), que depois são tratados cientificamente. O estudo dessa entidade ideal, inventada pela nossa mente, que é o objecto isolado, a partícula isolada, é apenas uma fase modelar, rumo à compreensão dos fenómenos sistémicos.

Por outro lado, o considerarmos os fenómenos como objectos do conhecimento físico é consequência do facto de o nosso subjectivismo epistemológico não esmorecer o nosso objectivismo ontológico (fundamentámos oportunamente a nossa crença na existência de um mundo incognoscível em toda a sua plenitude, que existe para além do sujeito que o procura conhecer).

Assim, colocámos a palavra «objectos» entre aspas, não para retirar aos fenómenos físicos qualquer realidade objectiva, mas, sim, para indicar que na representação científica desses fenómenos intervêm (e desempenham papel fundamental) não só entidades tangíveis, mas também entidades abstractas, não tangíveis (tais como o campo electromagnético, o fotão, a energia, a função de onda, a entropia e tantos outros). Estes são conceitos e, como tal, construções da mente humana.

Estas construções mentais intervêm, manifestam a sua presença nas nossas representações dos fenómenos, influenciam-nas, determinam-nas e limitam-nas. Neste sentido, embrenham-se nos objectos para produzir o conhecimento, manifestando-se com tanta realidade como os motores dos nossos automóveis que vemos funcionar. As paredes do cilindro do motor, que podemos ver e apalpar, desempenham uma função na construção da representação do fenómeno que se passa no motor: constituem as paredes de um sistema físico. A mistura explosiva, também tangível, tem igualmente o seu papel na representação: servir de suporte à energia. Esta, porém, não é um material, tal como a mistura gasosa que entrou para o cilindro, não exerce a força, não é a «causa» do carro andar, mas... *comanda* todo o processo. «Desaparecendo» ali e «aparecendo» acolá, «controla» tudo o que se passa, na medida em que nada ali acontece que faça variar o valor total da energia no Universo. Apesar de intangível, intervém de modo decisivo na *representação* do que sucede no motor. Sem ela não haveria conhecimento científico do motor do automóvel. Nem haveria motor. Neste sentido podemos dizer que ela é tão «real» como as paredes do motor. É a representação a construir a realidade cognoscível ...

Afirmámos que não é a energia que exerce a força no cilindro. Em termos microscópicos, fundamentais, quem a exerce são os campos, entes abstractos. Se alguém ficar espantado com a ideia de que um ente abstracto exerce uma força, é porque ainda não se familiarizou suficientemente com o conceito de força, e não conseguiu ultrapassar a barreira psicológica e antropomórfica de força.

De facto, esta grandeza também é uma *construção* da mente humana que serve, conjuntamente com todas as outras grandezas físicas, para erguer uma das mais maravilhosas edificações do génio humano - a Física. Sem estas construções mentais não haveria Física.

A Física é um produto da mente humana. É uma visão através da neblina da realidade, não a realidade. Mas não é uma visão de loucos, antes uma visão racional, produto dos dons com que a mãe-natureza nos brindou - os sentidos e a inteligência humana. Graças a estes dons, foi possível construir visões da realidade (como a do motor de automóvel) que «funcionam» tão bem como a própria realidade (o motor de automóvel), e a prova irrefutável está nas *performances* que a Ciência tem tirado da realidade exterior ao sujeito (do motor do automóvel). Isso faz esquecer aos cientistas dogmáticos, que ajudaram a evoluir espectacularmente o motor, o facto de não conhecerem em toda a sua plenitude o motor do automóvel que construíram... Por isso continuam a pesquisar sobre o que nele se passa, por exemplo sobre o fenómeno da combustão, que, apesar de parecer tão trivial, ainda hoje é objecto de investigação de ponta... porque não é completamente conhecido.

Estas «coisas», ideias por um lado e materiais por outro, intervêm de um modo interactivo na representação científica dos fenómenos. Como? Materiais são materiais: são concretos; ideias são ideias: são abstractas. É verdade. Mas a análise reflexiva que estamos a fazer e continuaremos a fazer procura mostrar que a separação entre ideias e materiais não é assim tão decisiva na Física. Afinal, aquilo que conhecemos acerca da matéria não é a própria matéria, mas ideias acerca dela.

Em Física, como construção humana da realidade, as paredes de um motor não podem ser desgarradas das ideias associadas a essas paredes: rigidez, densidade, temperatura, etc. É a consequência de vivermos num mundo dialéctico onde o conhecimento físico resulta de uma interacção dialéctica entre o cientista e o objecto que estuda (56).

Em conclusão:

A Ciência e, em particular, a Física, é uma construção racional assente em conceitos teóricos (energia, massa, campo electromagnético, tensor momento-energia, função de onda, etc.), enredados em modelos a que atribuímos uma realidade, mas trata-se de uma realidade forjada, não de uma realidade especular (representação autêntica, indiscutivelmente verdadeira do mundo).

Há, concerteza, conhecimento científico reconhecidamente verdadeiro, mas tal resulta de tautologias.

Quando olhamos Plutão, e afirmamos que a ciência astronómica descobriu Plutão, isto é uma verdade que resulta de se designar por Plutão um planeta longínquo que se move, como nós, em torno do Sol. Mas o conceito de Plutão é muito mais do que isso, é uma construção mental que está por desenvolver em toda a sua complexidade (incluindo ideias como espaço, massa, gravitação, e tantas outras ideias sempre em evolução).

Que o conhecimento científico não se descobre, mas se constrói, é a frase lapidar do construtivismo.

Expressões como «a lei da acção-reacção foi descoberta por Newton», ou «o conceito de inércia foi descoberto por Galileu», têm a conotação clássica de que algo objectivamente pré-existente e absolutamente verdadeiro estava à espera de um génio capaz de os encontrar. Não nos devemos esquecer que uma lei e um conceito são muito mais do que simples enunciados, são construções mentais que vão evoluindo à medida que as suas ligações com outras leis e outros conceitos se vão modificando.

Karin Knorr-Cetina afirma em «*The Manufacture of Knowledge*» (1983, p. 118) que “*a interpretação construtivista considera os produtos da ciência como primeiro e principalmente o resultado de um processo de fabricação (reflexiva).*”

O mundo da Ciência é uma realidade múltipla, a realidade de hoje não é a da amanhã, a realidade para um cientista não é exactamente a realidade para outro. Quantas e quantas visões da realidade não se confrontaram ao longo da história da evolução das ideias científicas?

O construtivismo que defendemos sustenta que **há analogias entre o processo individual de construção do conhecimento pelo ser humano e o processo colectivo de construção pela comunidade científica**. Esta tese foi defendida também por Piaget e Garcia (1987), Schwab (1964), Toulmin (1972), Novak (1992), entre muitos outros. Na secção 3.12 e no próximo capítulo apresentar-se-ão vários argumentos a favor dela. A ter realmente fundamento, deverá ser possível compreender-se melhor o modo como um ser humano organiza o seu conhecimento se analisarmos cuidadosamente o modo como a Ciência evoluiu ao longo da história.

Este construtivismo pessoal tem ressaltado como resultado de trabalhos de reflexão e investigação em variados domínios. Assim, e só para referir alguns (Driver, 1988, p. 134, Anderson, 1992, p. 1038):

- Trabalhos de investigação que mostraram que o processo de leitura envolve o uso de construções de esquemas interpretativos do que está escrito.
- Investigações no domínio da resolução de problemas que revelaram que a confrontação de cada indivíduo com um problema se inicia pela construção de uma representação do chamado “espaço do problema” que governa o modo como a informação está codificada.

- Pesquisas em Psicologia acerca do funcionamento do raciocínio humano que sugerem que este, em vez de se basear em princípios gerais de lógica formal, assenta em inferências retiradas de representações mentais.
- Investigações recentes em Neurobiologia e Ciência cognitiva que apontam também no sentido de os mecanismos do cérebro mediar as interações dinâmicas entre os subsunçores e os dados imediatos dos sentidos.

A terminar afirmamos que não seria uma atitude construtivista assegurar em termos absolutos a verdade do construtivismo tal como o apresentámos. Parece-nos, porém, uma visão bastante funcional acerca do funcionamento da Ciência, esta que defendemos hoje...

3.9. O conhecimento físico de cada ser humano é uma construção pessoal e idiossincrásica - 4º Princípio

O conhecimento físico de um fenómeno por cada ser humano é um processo *complexo*. De facto, ele envolve, logo à partida, abstracções empíricas e reflexivas, que têm que ver, no mínimo: com a definição do sistema em estudo; com a escolha das variáveis que o influenciam que são matematizáveis; com a complexidade da percepção humana; enfim, com uma série de construções mentais por parte do sujeito cognoscente. Depois, o sujeito, no acto de conhecer, vai ter de *interferir* com o próprio objecto que pretende conhecer. Para além disso, o sujeito cognoscente terá de se servir de construções prévias da própria ciência e irá partilhar os seus resultados cognitivos, no mínimo com outros sujeitos que fazem parte da mesma comunidade científica.

Cada sujeito tem as suas características intelectuais e sentimentais próprias, as suas idiossincrasias, que tornam a apreensão do significado do objecto um acto eminentemente pessoal.

Quando confrontado com um fenómeno em estudo, desde logo se colocam a um sujeito cognoscente problemas que têm que ver com os mecanismos psicofisiológicos inerentes a ele próprio. É a este respeito que as Ciências e Tecnologias da Cognição (ver nota 5), hoje em dia consideradas fundamentais, poderão dar um enorme contributo. Os conhecimentos desta área são fundamentais. Mas não podemos cair, por exemplo, no *psicologismo* de alguns que julgam que ficarão a dominar completamente o acto de conhecer com o domínio dos mecanismos psicológicos que estão subjacentes a esse acto.

De facto, o que o dito sujeito cognoscente vai fazer é construir uma representação, relacionando, de modo lógico, conceitos que já possui com outros conceitos que para ele serão novos. E, assim, o conhecimento acaba por cair também na esfera lógica. Porém, a lógica só responde (e, mesmo assim, de modo incompleto) perante a coerência dos passos dedutivos do raciocínio utilizado para conhecer o novo fenómeno. Não tem nada a ver com a concordância entre a representação e o fenómeno a que se refere.

Não devemos, portanto, cair na *atitude logicista* de acreditar que todos os problemas que envolvem o processo do conhecimento ficam resolvidos uma vez verificada a coerência lógica dos raciocínios desenvolvidos. Fica por resolver o problema da *validade da representação* que o sujeito construiu, isto é, em que medida essa representação concorda com o fenómeno que pretende representar. Este problema cai na *esfera ontológica*, na medida em que tem que ver com a verdadeira natureza do fenómeno, discutindo a questão de a construção mental acerca do fenómeno ser ou não ontologicamente verdadeira, isto é, corresponder ou não a hipotéticas características do fenómeno independentes do sujeito que as conhece (o que poderíamos designar por características absolutas do fenómeno).

Do ponto de vista psicológico, sabemos hoje que o conhecimento físico se baseia na percepção dos objectos, mas não exclusivamente, nela. A percepção do objecto desencadeia todo um processo complexo que ocorre no cérebro e que envolve não apenas a estrutura cognitiva do ser cognoscente, mas também a sua estrutura afectiva e volitiva.

A este respeito, lembramos o modo como Piaget encara a descoberta das propriedades de um objecto, através do acto perceptivo. Intervêm sempre classificações, ordenações, funções e outras estruturas lógico-matemáticas. Sem estas, as leituras perceptivas não seriam possíveis. (Piaget, 1986, p. 89).

Por outro lado, de acordo com a psicologia de Ausubel só há aprendizagem significativa de um novo conhecimento por parte de um ser humano, isto é, uma incorporação não arbitrária do novo conhecimento na sua estrutura cognitiva, se o novo material possuir determinadas características, mas também se houver uma predisposição desse ser humano e a vontade de apreender o novo material significativamente.

Em suma: as ideias prévias que o ser cognoscente possui, assim como os seus sentimentos, emoções e vontade de conhecer são aspectos decisivos no acto cognitivo.

De um ponto de vista fisiológico, tudo aponta para que o processo complexo de tratamento de informação que ocorre no nosso cérebro, como resposta a um estímulo exterior, vá produzir um registo não absolutamente idêntico ao estímulo que o originou. E mais do que isso: as investigações que recentemente têm sido efectuadas no sentido de esclarecer o funcionamento do cérebro, particularmente o modo como adquirimos o conhecimento do mundo exterior, apontam no sentido de sustentar o ponto de vista construtivista (Anderson, 1992, pp. 1037-1058).

Como o próprio Anderson reconhece (1992, p. 1039), “*ainda temos uma compreensão limitada do modo como as mais altas funções cognitivas estão relacionadas com a estrutura e funcionamento do cérebro*”. Porém, alguns dos princípios que já é possível produzir (ver nota 44) acerca dos mecanismos de funcionamento desse centro intelectual, mais ou menos solidamente estabelecidos, apontam no sentido de uma **clara intervenção idiossincrásica (por meio das ideias prévias, sentimentos, emoções e vontade) do sujeito cognoscente no processo mental do conhecimento**, o que constitui uma das teses fundamentais do construtivismo estabelecido por via essencialmente psicológica.

Segundo o *construtivismo* que defendemos, o sujeito cognoscente vai construindo e reestruturando progressivamente, num processo dialéctico, os seus esquemas ou representações mentais acerca do mundo que o rodeia. Esta construção ocorre através de uma actividade permanente de relação-confrontação de toda a informação recolhida da sua experiência (de manuseamento dos objectos) e da linguagem (inerente à sua interacção social) com as ideias que a mente já possui, com fluxos de informação que envolvem a memória.

Não há nada provado acerca da hipótese de que as primeiras ideias do ser humano sejam transmitidas por hereditariedade. Por hereditariedade transmite-se uma potencialidade para se estabelecer uma determinada arquitectura neuronal favorável a este ou àquele fim.

A hipótese das condições *a priori*, transcendentais, não é sustentável. A partir do momento em que no recém-nascido surgem as primeiras estruturas do pensamento (por um processo que já referimos), as concepções do ser humano vão mudando ao longo da vida à medida que ele vai interagindo com mais e mais objectos. O sujeito vai construindo uma síntese entre as suas representações do mundo e as novas vivências, as novas experiências por que vai passando nesse mundo, isto é, acontece uma síntese cognitiva subjectual, entre o sujeito e a experiência vivida com o objecto.

O construtivismo não considera o cérebro-máquina, isto é, a mente humana como uma *caixa negra* em que é possível associar a mesma resposta ao mesmo estímulo. O construtivismo considera que o tratamento da informação proveniente do mundo exterior e, conseqüentemente, a resposta de cada indivíduo aos estímulos que dele provêm, variam muito de pessoa para pessoa, desempenhando um papel importante componentes até há pouco tempo desprezadas (caso das componentes afectiva e volitiva).

Cada cérebro é uma fortaleza (de que os órgãos dos sentidos são uma espécie de portas avançadas) onde, a nível neural, se desenrola uma interacção permanente entre as ideias memorizadas pelo sujeito cognoscente e os estímulos provenientes dos objectos do conhecimento, sendo essa interacção influenciada por factores emocionais e volitivos.

O conhecimento físico não pode, pois, considerar-se empiricamente puro, desligado de qualquer organização mental do sujeito, **nem** pode ser encarado como **racionalmente puro**, isto é, como uma actividade do sujeito completamente desgarrada do mundo exterior. Também não pode ser visto numa perspectiva comportamentalista do tipo estímulo-resposta, já que a actividade e a idiossincrasia de cada sujeito é preponderante.

Por outro lado, nem a visão fenomenalista do tipo kantiano (57) nem a fenomenologia de Husserl (58) respondem cabalmente ao problema da essência do conhecimento mas, ainda assim, têm a virtude de colocar o centro de gravidade do conhecimento no seu devido lugar: a intersecção dos domínios do sujeito e do objecto.

O conhecimento do mundo físico é uma construção dialéctica, segundo cremos, e já o afirmámos a propósito do problema da origem do conhecimento. Repetimo-lo agora a propósito do problema da essência do conhecimento. A dialéctica do conhecimento do mundo físico envolve a ideia e a experiência, o pensamento e a acção, o sujeito e o objecto, enfim tudo o que interfere no conhecimento. Esta visão do conhecimento científico reconhece a existência de uma síntese dialéctica face a esse conhecimento, mas pressupõe muito mais do que isso: uma determinada ideia acerca do mundo.

O conhecimento do Universo vai-se construindo (e assim evoluindo) numa interacção recíproca permanente entre o ser humano e o próprio Universo que também o inclui e com ele evolui. Esta **evolução é permanente, progressiva, em espiral.**

Que indícios nos levam a acreditar nesta dupla evolução dialéctica: do mundo e das ideias acerca dele?

Essencialmente a história: a do mundo e a das ideias acerca do mundo (59).

Procurando resumir e sistematizar as ideias construtivistas que desenvolvemos e iremos continuar a desenvolver, diremos o seguinte:

1º - Não temos acesso ao conhecimento pleno do mundo exterior. Não existe uma base observacional objectiva, não há um referencial indiscutivelmente verdadeiro a que poderemos ter acesso e relativamente ao qual confrontamos as nossas concepções. **Vamos construindo e reestruturando progressivamente os nossos esquemas acerca do mundo** com base na nossa actividade mental, na interacção que temos com o exterior, no fundo na nossa experiência de vida interior e exterior.

2º- O construtivismo é muito mais do que uma filosofia da Ciência. É uma visão da Psicologia e da Educação do ser humano. Assenta, fundamentalmente, em dois princípios:

- **o ser humano não nasce com concepções, não possui ideias inatas acerca do mundo;**
- **o ser humano constrói ele próprio, lenta e dificilmente, as suas ideias acerca do mundo que o cerca, as quais constituem apenas uma representação, um cenário, uma imagem possível desse mundo.**

3º - **Em termos filosóficos**, o construtivismo que defendemos:

- opõe-se ao *realismo* que considera a existência de uma realidade exterior absolutamente cognoscível, que orgulhosamente defende que o conhecimento científico há-de proporcionar uma visão autêntica, uma cópia absolutamente fiel dessa realidade.
- nega o *idealismo* que assume serem as nossas ideias as únicas realidades, não havendo qualquer outra realidade exterior a elas;
- opõe-se ao *positivismo* que garante nada existir para além dos dados perceptivos, que esses dados traduzem a única e verdadeira realidade;
- considera que o conhecimento científico é pessoal e socialmente construído sem a pretensão de atingir a verdade indiscutível acerca do mundo;
- entende que a actividade científica não descobre verdades pré-existentes, trata-se, sim, de uma «negociação» de significados entre os membros da comunidade científica envolvendo aspectos sociológicos importantes, e conduzindo a uma construção imperfeita e sempre inacabada;
- considera o conhecimento científico de cada ser humano uma construção pessoal e idiossincrásica de significados acerca do mundo, os quais vão evoluindo de acordo com a experiência de vida;
- vê o conhecimento científico como uma estrutura maleável de conceitos e relações entre conceitos, estrutura essa que vai evoluindo.
- sustenta a ideia (piagetiana) de uma certa correspondência entre o modo como o ser humano constrói as suas próprias representações acerca do mundo e o modo como o conhecimento do Universo evoluiu historicamente (Piaget e Garcia, 1987, Novak, 1990, Toulmin, 1972). (60).

4º - Numa perspectiva psicológica o construtivismo:

- opõe-se às teorias associacionistas ou comportamentalistas que defendem ser o intelecto uma caixa negra que responde ao mesmo estímulo com a mesma resposta e que é apenas cognoscível através das respostas a estímulos;
- tem subjacente uma psicologia cognitivista adequada ao ser intelectual que é o Homem;
- rejeita o *objectivismo* das percepções humanas que considera as mesmas dependentes exclusivamente dos objectos exteriores (Davis et al., 1993, p. 628);
- rejeita o *subjectivismo* que considera as percepções totalmente subjectivas porque completamente idiossincrásicas;
- considera a nossa percepção dum fenómeno como uma acto complexo em que as ideias existentes na estrutura cognitiva influenciam o produto dessa percepção, pelo que este produto não é um espelho do fenómeno;
- rejeita a ideia de que existe uma evolução intelectual por estádios independentes da aprendizagem e de aspectos sociais;
- defende que a construção do conhecimento científico por cada ser humano é influenciada por aspectos cognitivos, afectivos e volitivos, isto é, que o pensamento, sentimentos e emoções por um lado, e a vontade e a acção por outro, comandam o modo como se dá a apreensão do conhecimento individual.

5º - Finalmente, **numa perspectiva educativa**, o construtivismo defende que:

- a educação científica não deve ser encarada como a transmissão de parcelas de verdade (Thomaz, 1987, p. 23), mas como um modo de desenvolver no aluno o espírito científico que o levará a explorar por ele próprio o domínio da Ciência;
- a aprendizagem é uma actividade de exploração pessoal que conduz a uma reorganização activa de uma rede de significados acerca do mundo previamente existente;
- a aprendizagem de um aluno depende do ensino que lhe é ministrado, mas de modo algum se pode confundir com ele; é bastante influenciada pelas características de cada aluno;
- a apreensão de novos significados para a experiência humana é uma condição necessária para que ocorra uma boa aprendizagem, mas não é uma condição suficiente (Gowin, 1990, p. 125);
- o papel do professor é o de um facilitador e orientador da mudança conceptual que vai ocorrendo no aluno, proporcionando-lhe experiências de aprendizagem propiciadoras de conflitos intelectuais (entre novas percepções e ideias existentes) que revelem a necessidade de novas concepções;
- o conhecimento do estudante não é validado por meio de qualquer correspondência entre os seus esquemas conceptuais e uma realidade a que se referem; a sua validação assenta na coerência interna dos esquemas e na coerência entre eles e os novos estímulos proporcionados.

3.10. O problema das formas, das motivações e da metodologia da Física

Vamos passar a discutir questões como as seguintes: *que formas assume o conhecimento físico do mundo? O que motiva o seu estudo? Há algum método científico na Física? Será que a Física é o resultado da introdução do chamado método experimental por Galileu? Qual é o papel da intuição na construção do conhecimento físico? E da imaginação?* Tal como procedemos até aqui, vamos começar por considerações de índole histórica.

Vimos que grande parte da discussão histórica acerca do conhecimento do mundo girou em torno do poder que os órgãos dos sentidos e a razão do ser humano têm na construção desse conhecimento. Já os pensadores gregos distinguiam entre:

- um **conhecimento sensorial** do mundo, descritivo, que tinha por alvo a distinção e classificação da pluralidade dos seres, o aparente, ou seja o que aparece e tal como aparece - o *mundo sensível, concreto*;
- e um **conhecimento racional**, obtido através do intelecto, procurando alcançar uma estrutura unitária do mundo, a essência dos objectos, a sua realidade, o que eles são - o *mundo das ideias, abstracto*.

Estes dois tipos diferentes de conhecimento originaram dois modelos metodológicos opostos, um **modelo indutivo** e outro **modelo formal ou dedutivo**:

- Quando, na Ciência, se parte do conhecimento sensorial de alguns fenómenos particulares e se generaliza para todos os fenómenos da mesma espécie, faz-se **indução**. Na indução parte-se dos factos particulares ao encontro das regularidades ou leis de carácter geral.

Um exemplo: quando caminhamos para Norte, vamos observando que a estrela Polar fica cada vez mais alta; mesmo sem observarmos todos os casos, isto é, mesmo sem atingirmos o pólo Norte, poderemos *induzir* a conclusão de que a altura da estrela Polar aumenta com a latitude de onde se observa.

- Quando, pelo contrário, se parte do conhecimento racional baseado em grandes princípios gerais e se extraem conclusões a respeito de fenómenos particulares, faz-se **dedução**. Na dedução parte-se de leis de carácter geral ao encontro de factos particulares. Exemplo: a partir dos princípios da conservação da energia e da conservação da quantidade de movimento (ou momento linear) pode-se *deduzir* o comportamento de duas bolas de bilhar ao colidirem, em condições particulares conhecidas.

Por outro lado, também desde longa data o ser humano se deu conta de que dispõe de dois modos de apreender o significado do mundo que o cerca:

- um **modo intuitivo**, aquele em que a mente capta directamente as características dos objectos: é um conhecimento *imediato*, porque não há operações intermédias entre o sentir e o conhecer- conhece-se «*sentindo*»;
- e um **modo reflexivo**, em que a razão reflecte sobre aquilo que se sente: é um conhecimento *mediato*, que também se designa por conhecimento **discursivo** - conhece-se «*pensando*».

Finalmente, já Sócrates distinguia com grande clareza entre:

- um conhecimento a nível da «*opinião*» («*doxa*»): é o que hoje se costuma chamar **conhecimento vulgar**, do dia a dia, do senso-comum;
- um conhecimento a nível da «*ciência*» («*epistème*»): é o que designamos por **conhecimento científico**.

Ao apresentarmos estas classificações, torna-se metodologicamente mais fácil discutir problemas importantes, como, por exemplo, o de saber como se desenvolvem estas diferentes formas de conhecimento, qual a importância de cada uma delas. Algumas questões concretas a que vamos procurar dar resposta são as seguintes:

- *O conhecimento científico é uma continuidade do conhecimento vulgar ou essas duas formas de conhecimento opõem-se?*
- *Qual é o papel da indução e da dedução no estabelecimento do conhecimento físico?*
- *Qual é a importância atribuída à problematização, à observação, às hipóteses e à experimentação?*
- *Qual é o papel dos modelos físicos?*
- *Qual é a importância de diversos factores, metafísicos, sociais, etc., na visão da Ciência e da sua metodologia?*

3.10.1 A influência dos factores sociais na Ciência

É conhecida a influência de diversos factores sociais logo no desenvolvimento inicial da Ciência: a descoberta da agricultura, a criação de instrumentos necessários para a agricultura, a domesticação dos animais, a melhoria da alimentação, das técnicas de construção de abrigos, as viagens e as trocas comerciais, a necessidade de conhecimentos astronómicos, do cálculo, da escrita, das unidades de medida para as viagens e trocas comerciais, etc., etc. (61).

O povo da antiga Grécia era próspero e podia dar-se ao luxo de trabalhar bastante com o intelecto e não só com as mãos. É certo que nem só com o trabalho manual, nem apenas com o trabalho intelectual, se construiu o conhecimento científico. O facto de os primeiros homens que começaram a filosofar, isto é, a interrogar-se acerca do mundo e de si mesmos, terem surgido na Grécia não se deve a um arbítrio divino. É o fruto da prosperidade. Esta esteve na base do aumento demográfico então verificado, com a consequente formação de colónias ao longo da costa mediterrânica e a expansão das trocas comerciais. Tudo isto contribuiu para o estabelecimento de uma sociedade democrática onde era possível a troca livre de ideias, uma educação livre. A *educação* é um dos factores vitais no desenvolvimento da Ciência. E foi precisamente numa dessas cidades ricas que a prosperidade permitiu desenvolver, concretamente na cidade de Mileto, na Ásia

menor, que surgiu, no século VI a.C., a primeira das *escolas gregas* - a **Escola Jónica**. Foi lá que um homem, ligado aos mercadores, iniciou a lenta, penosa e inacabada tarefa da luta da Ciência contra o mito e a ignorância. Chamava-se Thales.

3.10.2 A influência das convicções metafísicas

Para **Thales** a Terra era um disco plano, flutuando à superfície da água. Encontrava-se coberta por uma cúpula de água onde flutuavam os astros. Não havia céus nem infernos. Era uma representação pessoal do mundo, aquilo, afinal, que é a ciência de cada um. Como toda a concepção individual, revelava-se profundamente idiossincrásica, estando influenciada por diversas crenças. Crê-se que o que levou Thales a construir aquele modelo realista do Universo, a supor que a origem de tudo está na água, foi o facto de *acreditar numa antiga associação mítica entre a água e a felicidade*.

Cerca de um século depois de ter surgido a Escola Jónica, apareceu uma outra, a **Escola Pitagórica**. E com ela surgiu um exemplo paradigmático da influência das convicções metafísicas acerca do mundo no progresso do conhecimento científico. Estes pensadores desenvolveram bastante a Matemática, tendo sido motivados para o seu estudo pela *crença, que tinham, num mundo em que «todas as coisas têm um número e nada se pode compreender sem ele»* (frase célebre de Filolau, um pitagórico). Ter um número é, afinal, ter uma medida, ser quantificável e, como tal, manipulável através da Matemática.

Em termos metodológicos, os pitagóricos são considerados os inventores da demonstração matemática, tão importante no desenvolvimento da Ciência. Eles usaram-na, por exemplo, para demonstrar o teorema de Pitágoras e para demonstrar a existência dos números irracionais, sempre com o intuito de compreenderem melhor o mundo.

O seu modelo de Universo era diferente do de Thales, porque a sua crença na esfera como sólido perfeito, o terem verificado que a Terra era redonda (porque os mastros dos barcos eram a primeira parte a aparecer e a última a desaparecer no horizonte), e o raciocínio por simetria levaram-nos a considerar o Universo geoestático constituído por sete esferas celestiais, a cada uma delas pertencendo um astro. Para eles, *«as sete esferas celestiais davam os sete sons da lira»*...(62)

3.10.3 A dialéctica do conhecimento do mundo

O metafísico **Heraclito de Éfeso** (c. de 540 - c. de 480) acreditava num mundo em permanente devir (*«a água de um rio nunca é a mesma»*), em que todas as coisas estão sujeitas a uma alteração permanente e surgem de uma harmonia oculta dos contrários.

A metodologia de conhecimento do mundo tinha de ser dialéctica, porque o mundo é dialéctico, não se devia basear na identidade dos objectos consigo próprios, porque nada é igual a si próprio, mas na contradição inerente a tudo o que existe. Segundo Heraclito, a lei universal tem de ser descoberta na harmonia dos contrários e sua mútua «tensão». O conhecimento físico terá de se reportar a um mundo em mudança, e não pode ser a descrição de um mundo congelado, estático. Estas ideias influenciaram o grande filósofo idealista alemão Hegel, e Hegel está na origem de toda a visão dialéctica associada ao pensamento moderno.

Com ideias opostas a Heraclito, os **eleatas** (assim designados porque os seus mais notáveis representantes, Xenófanes, Parménides e Zenão filosofaram em Eleia, colónia grega ao sul de Itália) acreditavam que o mundo é perfeito e imutável, sendo tudo redutível a uma unidade, a um princípio último - **visão monista** do mundo. Ora, a partir de uma única realidade, não é possível haver a pluralidade. Então, essa pluralidade e o movimento são consequência da imperfeição dos nossos **sentidos** que, por isso, são **enganadores** (63). Consequentemente é **a razão e não os sentidos o meio de conhecer o mundo**. Através da razão é

possível atingir juízos irrefutáveis e universalmente válidos, e nesse facto se basearam os racionalistas de toda a história.

O **atomismo grego** é o *fruto da dialética na produção do conhecimento*. Aproveitando de Heraclito as ideias de *multiplicidade, diversidade e mudança* e de Parménides as suas antíteses, de *unidade, indivisibilidade e permanência*, **Anaxágoras** (500 - 428) tem a intuição do atomismo: tudo o que é material contém em si mesmo «sementes» ou «grãos» de outras coisas materiais.

Com base nesta intuição, **Leucipo** de Mileto (séc. V a.C.) e **Demócrito** de Abdera (c. de 460 - c. de 370) admitiram que tudo é formado de átomos e vazio. A matéria é divisível até ao nível do átomo, mas não abaixo desse nível. Os átomos são todos da mesma natureza material, eternos e imutáveis, só diferindo pelo tamanho e dimensões. A mudança consiste na reunião ou separação de átomos. As propriedades objectivas resultam da configuração e posição dos átomos e as subjectivas da interacção dos átomos do objecto com os do sujeito. *O movimento é eterno, causado por uma «tensão» existente entre os átomos e o vazio.*

As ideias atomistas surgiram, depois hibernaram e mais tarde ressurgiram, e o mesmo sucedeu com outras ideias científicas importantes. Não tendo acolhido o apoio de Aristóteles, a ideia de átomo foi praticamente esquecida. Porém, na Renascença e principalmente, no século passado, o atomismo ressurgiu em força. Entre as ideias que os atomistas legaram para a Ciência temos:

- a existência real do *ser* (átomos) e do *não ser* (vazio);
- uma distinção entre *propriedades objectivas* (provenientes dos átomos em movimento no vazio) e *propriedades subjectivas* (a cor, o frio, etc.);
- a ideia de um *modelo mecanicista e determinista* em que tudo se interpreta mecanicamente com base nos átomos;
- a *rejeição do antropomorfismo* como estando subjacente à explicação do mundo.

3.10.4 A intuição, a dedução e a indução no conhecimento científico

Os sofistas servem-nos de exemplo para referirmos uma outra faceta do conhecimento. *O conhecimento não se desenvolve apenas com fins de investigação pura e desinteressada.* O conhecimento serve os mais variados interesses, alguns mesmo bem materialistas. Os sofistas serviam-se do ensino para conseguir grandes fortunas.

Desenvolveram a Retórica, que passou a ser considerada como disciplina importante na formação do ser humano. Os sofistas foram os primeiros filósofos que colocaram claramente o problema do conhecimento pleno da realidade exterior, abolindo para sempre o dogmatismo, em sentido restrito, da história da Filosofia, tal como já afirmámos. Eles eram relativistas e subjectivistas.

Sócrates (470-399) acabou por se considerar o mais «sábio» dos mortais, por ter a consciência, ao contrário dos outros, de que nada sabia. Ele possuía essa consciência porque considerava o conhecimento humano o resultado ilusório dos sentidos e, como tal, ao nível da opinião (*doxa*). Para ele, a verdade encontrava-se no interior do homem e, por isso, devia ser objecto de pesquisa pessoal, acompanhada de uma atitude dialéctica permanente dentro da comunidade.

Em suma: Sócrates defendia que **ao conhecimento universalmente válido, o conhecimento científico, apenas se tem acesso através do pensamento** (64).

Os grandes pensadores racionalistas ou predominantemente racionalistas, como **Platão** (428-437) e os **neoplatónicos**, acreditavam que **o conhecimento se processa «de cima para baixo»** no que toca à prioridade e ao valor, isto é, parte--se do conhecimento racional ao encontro do conhecimento sensorial. Devemos desconfiar do conhecimento vulgar, do conhecimento da opinião. Ele não se encontra ao nível do conhecimento científico, não é universalmente válido. Só pelo pensamento é que atingimos as essências inteligíveis do nosso mundo.

Platão acreditava numa **intuição** do intelecto humano para captar as Ideias, que são os arquétipos da realidade. A história viria a confirmar que a intuição intelectual, essa «**luz genial**» que alguns homens tiveram e que lhes permitiu descobrir saídas para enigmas, contribuiu, de facto, para o surgir de grandes ideias, que muito contribuíram para o progresso do conhecimento.

Platão fez corresponder a uma *hierarquia gnoseológica* de opinião (*doxa*)- ciência (*epistème*) uma *hierarquia ontológica* de *mundo sensível* (da opinião)-*mundo das ideias* (da verdade).

Ao contrário de Platão e dos pensadores neoplatónicos, **Aristóteles** (384-322) e os pensadores **aristotélicos** consideravam que **o conhecimento do mundo se processa «de baixo para cima»**, isto é, devemos partir do conhecimento sensorial ao encontro do conhecimento racional. Com os sentidos conseguimos obter imagens dos objectos. Com o entendimento conseguimos despojá-los das características individuais, separá-los, classificá-los e formar conceitos ou ideias universalmente válidas acerca deles. Estes pensadores, entre os quais se conta São Tomás de Aquino, **desvalorizam o poder da intuição intelectual** no conhecimento do mundo físico (65).

Aristóteles era um observador e experimentador, ao contrário do que muitas vezes se afirma. Realçava mesmo a importância da observação (Cohen, 1988, p. 30). Por exemplo, em Zoologia abriu metodicamente ovos de galinha fertilizados e observou de modo controlado o desenvolvimento do embrião do frango até atingir a forma de pinto. No domínio da Astronomia, observou por exemplo a forma redonda da sombra da Terra na Lua, argumentando que isso é uma prova de que a Terra é redonda. Observou e descreveu com pormenor o arco-íris lunar.

As maiores limitações de Aristóteles como físico resultaram de **não controlar** da melhor forma as diversas **variáveis** que entram nos fenómenos complexos da Natureza e de **não recorrer à Matemática** como ferramenta da Física. Isso impediu-o de interpretar da melhor forma as experiências que realizou.

Aristóteles preocupou-se muito mais com a **dedução** do que com a **indução**, e disso o acusou o filósofo renascentista Francis Bacon. O Estagirita foi o primeiro a formalizar o processo de raciocinar dedutivamente, através dos seus famosos **silogismos**, de que apresentamos um exemplo:

Todos os homens são mortais - *premissa maior*;
Sócrates é um homem - *premissa menor*;
Consequentemente, Sócrates é mortal. - *conclusão*.

Os silogismos aristotélicos poderão ter algum interesse académico, mas **não têm interesse em termos da metodologia da Ciência**, porque não garantem só por si a veracidade das premissas. E se as premissas falham, a conclusão também... Aristóteles é justamente acusado de ter reduzido toda a metodologia dedutiva a simples silogismos, e de ter atrasado o aparecimento de uma metodologia de indução; de ter sobrevalorizado a observação e a conceptualização qualitativa, com prejuízo da racionalização matemática; de ter recorrido frequentemente ao senso comum na interpretação dos fenómenos, tal como hoje muitos alunos de todos os graus de ensino e homens cultos fazem. Mas se cometeu grandes erros que tiveram repercussão na história da Ciência, também construiu algo de muito positivo. E **o progresso do conhecimento científico constrói-se também com base numa dinâmica em torno do erro**, conforme discutiremos noutro lugar.

O estagirita pode considerar-se o primeiro homem que criou uma verdadeira **Física**, como quadro conceptual com alguma coerência e autonomia. Queremos dizer com isto que estamos perante uma **construção teórica** assente em princípios fundamentais, com a qual Aristóteles procurou interpretar os fenómenos naturais, isto é, passar dum estado de pretensa ignorância a um estado de pretensa lucidez acerca deles (66).

Uma **característica importante nas construções teóricas** é a seguinte: **partem de princípios com carácter axiomático**. Se um for falso, toda a construção teórica

falha. Se alguém, no tempo de Aristóteles dispusesse de um processo experimental de provar que o vazio existe, toda a teoria de Aristóteles cairia por terra (67).

3.10.5 Existência de concepções antitéticas acerca do mundo

No **período da cultura helenística** -período em que as culturas grega e oriental se fundiram como resultado das conquistas de Alexandre Magno (356-323)-impuseram-se dois sistemas opostos de encarar a evolução do mundo. Esses dois sistemas, embora perseguindo o objectivo comum que era a felicidade humana, conduziram a atitudes opostas face ao conhecimento da Natureza.

Um desses sistemas é o **epicurismo**, cujo pai é **Epicuro** de Samos (341-270). Adoptou o atomismo de Demócrito, mas com uma grande diferença: o movimento natural dos átomos é a queda vertical e todos os átomos caem à mesma velocidade (influência de Aristóteles). Se eles chocam uns com outros, isso deve-se a um movimento imprevisível e casual.

O epicurismo considera o mundo como um grande sistema em evolução permanente, formado de átomos a mover-se num vazio infinito. Tal como todos os outros seres universais, também o corpo e a alma humanas são formados por átomos. O mundo evolui ao acaso e não ao sabor de leis universais, terrestres ou divinas. Os seus três grandes **princípios** são:

- os átomos podem chocar ente si e combinar-se, originando mundos;
- o **universo é indeterminista**;
- o homem é um ser dotado de livre arbítrio (devido à imprevisibilidade dos átomos que constituem a alma humana).

O epicurismo foi poeticamente transformado num grande sistema cosmológico. Com efeito, o poema *De rerum natura* («*Sobre a natureza das coisas*») do poeta romano **Lucrécio** (c. de 94 - 55) consagrou o epicurismo e perpetuou-o, com a finalidade de eliminar a superstição e o medo do castigo dos deuses.

A antítese do epicurismo é o **estoicismo** (68). Para os estóicos, o mundo não é descontínuo, não é atomizável. Se o mundo fosse constituído por uma infinidade de átomos evoluindo ao acaso, pensavam eles, o mundo seria incompreensível. Ora, eles achavam que o mundo é compreensível, obedece a um **determinismo rigoroso**, é governado por **leis universais**. A Astrologia era qualquer coisa de muito importante para eles, pois acreditavam que o que acontece no macrocosmos (que inclui o enorme firmamento) deve estar relacionado com o que acontece no microcosmos (no homem).

Ao contrário do epicurismo, o estoicismo distingue intrinsecamente o homem dos restantes animais. Estes guiam-se pelo instinto. O homem guia-se essencialmente pela razão, com base numa lógica essencialmente indutiva. **O conhecimento parte dos sentidos**, segue-se uma “*impressão na alma*” (para adoptar a expressão de Zenão de Cítio, fundador do estoicismo) e termina na compreensão científica.

Não é difícil encontrarmos posteriormente, na história da Ciência, algumas das ideias destas duas grandes escolas antagónicas, elaboradas a outros níveis.

Por um lado, sabemos que as **ideias epicuristas** foram discutidas de novo na Idade Média por filósofos árabes e, na Renascença, **Bacon**, Giordano **Bruno** e Pierre **Gassendi** defendiam a existência de átomos. As ideias atomistas de Gassendi teriam passado para **Boyle** e deste para **Newton** que era filosoficamente atomista. As ideias de mónadas* de **Leibniz** são um modo muito pessoal de encarar o atomismo. As ideias corpusculares dos físicos que fundaram a Mecânica Estatística também. O atomismo de Dalton, no século XIX, é uma segunda versão, evoluída, do atomismo grego. Outras ideias epicuristas também se foram modificando e *reaparecendo*, séculos depois, em formas mais evoluídas. Por vezes elas estão como que **escondidas** noutras ideias, mas estão lá. Por exemplo, a ideia de reacção química como criação de matéria diferente da que existe está na base do trabalho dos alquimistas: não será uma evolução progressiva da ideia epicurista de que os

átomos chocam, formando «*outros mundos*»? Ideias posteriores de que a natureza última do Universo é indeterminável, de que a Física deve desistir de procurar leis universais absolutamente verdadeiras, que não existem, mas apenas leis funcionais, que tem apenas de encaminhar-se para fins práticos, para o bem estar do homem, não serão produtos de uma transformação dialéctica da ideia do indeterminismo epicurista?

Por outro lado, como muito bem salientam Hall and Hall (1988, p. 53), “*as ideias estóicas de continuidade e de existência de leis naturais também persistiram sempre e fizeram escola*”. Se reflectirmos sobre a história da Ciência, encontraremos posteriormente ideias resultantes da transformação dialéctica das ideias estóicas, no energetismo, no determinismo laplaciano, na concepção actual de Universo onde imperam determinadas simetrias que têm como consequência a existência de leis universais de conservação.

3.10.6 São necessárias infra-estruturas para fazer funcionar os instrumentos do conhecimento

A Ciência, como produto cultural que é, requiere infra-estruturas para funcionar. Só com excelentes meios postos à sua disposição, os instrumentos fundamentais do conhecimento poderão funcionar eficazmente. Vamos ver nesta secção, através de exemplos históricos, a vantagem de a comunidade científica dispor de bons recursos e quais são os instrumentos fundamentais do conhecimento que então funcionam melhor.

Em Alexandria, capital do Egipto, reinou Ptolomeu I, general de Alexandre Magno e um dos três co-herdeiros que partilharam o império alexandrino após a sua morte. Ptolomeu I acarinhou a construção do maior templo universal do conhecimento antigo - a célebre **Biblioteca de Alexandria** e o **Museu** anexo.

Nesse **ambiente cultural**, em torno de muitos milhares de grandes obras, fervilhava o «diálogo» e negociação de concepções entre sábios famosos como **Euclides** (315-255), **Aristarco** de Samos (310- 264), **Arquimedes** (287-212) e **Hiparco** (160-124). Era um ambiente análogo ao que reina nos melhores dos campos universitários actuais. Quem pode dispor de uma biblioteca rica e de um museu interactivo tem grandes meios para construir o seu conhecimento do mundo.

Algumas das obras que enchiam as prateleiras dessa biblioteca eram originais escritos por alguns dos maiores matemáticos de sempre. Os «*Elementos de Geometria e de Aritmética*» de Euclides, por exemplo, constituem uma obra magistral do espírito humano onde esse matemático agregou, num todo harmonioso e coerente, as ideias matemáticas dos antigos com as suas próprias concepções. A metodologia seguida em que sobressai a *harmonia*, o *rigor* e a *clareza das demonstrações* é tão extraordinária que perdurou praticamente intacta até aos nossos dias.

Einstein considerava a geometria euclideana um exemplo de uma construção científica notável. E, de facto, quem teve o privilégio de a estudar algum dia, não poderá discordar da opinião de Einstein.

A **dedução** era a grande arma usada por Euclides. Com ele tornou-se possível, a partir de um reduzido número de axiomas, estabelecer um quadro conceptual que abarca toda a geometria chamada euclidiana e é o suporte de toda a Física Clássica.

Outro sábio da escola de Alexandria foi **Arquimedes** de Siracusa (287-212). Ele foi o maior cientista da antiguidade no que se refere à aplicação sistemática de métodos matemáticos para estudar os fenómenos físicos. Quem ouve contar as lendas acerca de Arquimedes fica com uma visão deturpada do seu tipo de investigação. Está a vê-lo a fazer experiências com coroas de ouro e prata, tanques de água, etc. Arquimedes foi acima de tudo um **grande matematizador da Física**, um homem hábil para manusear as variáveis matemáticas (Hall and Hall, 1988, p. 48), sendo nesse aspecto um **percursor de Galileu**. Por exemplo:

- estabeleceu uma série de proposições geométricas de “grande elegância matemática” a propósito do equilíbrio das alavancas;
- resolveu variados problemas relacionados com o centro de gravidade dos corpos;
- estabeleceu a lei do equilíbrio dos corpos flutuantes trabalhando com grandezas matemáticas, portanto por via teórica;
- usou polígonos regulares inscritos e circunscritos a uma circunferência para determinar com grande precisão o valor de π .

Se a Física de Arquimedes era essencialmente mas não exclusivamente matematizada, a Física de outros pensadores que se lhe seguiram, concretamente no campo da Pneumática e da Óptica, era predominantemente experimental ainda que matematizada (Hall and Hall, 1988, p. 49).

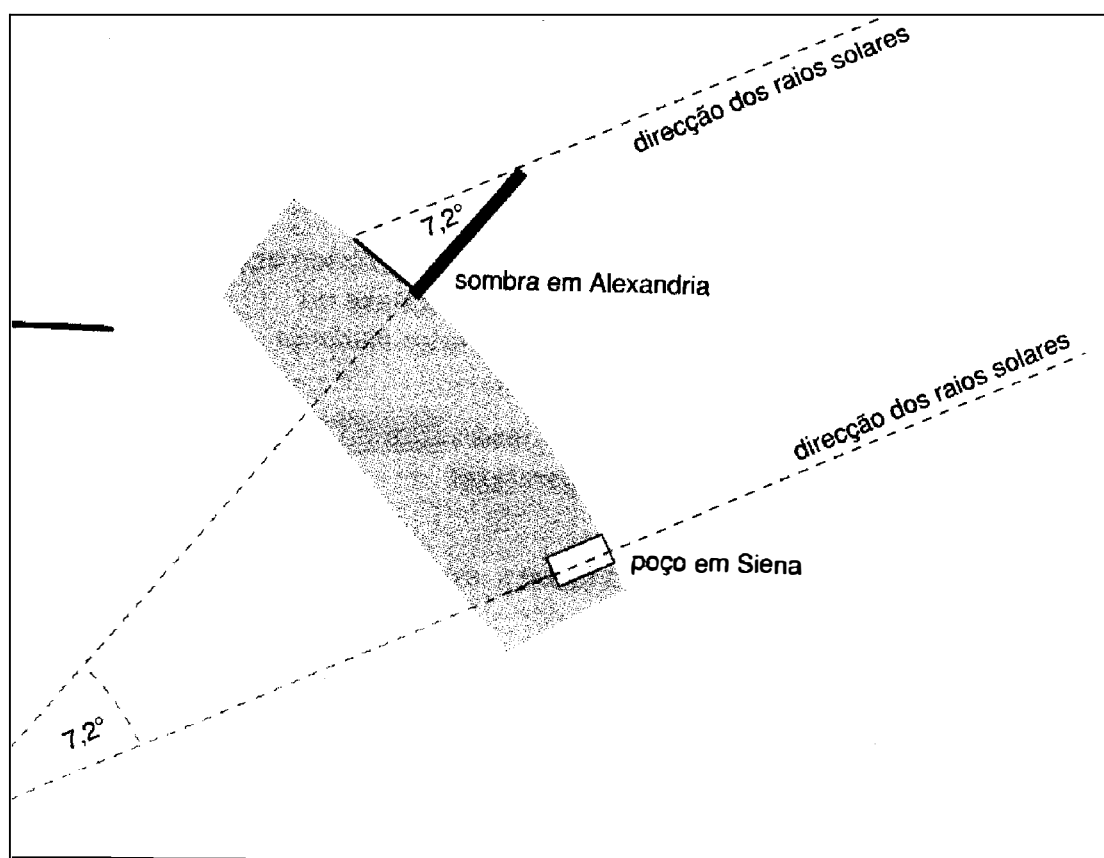
Eratóstenes (276-194), director desse maravilhoso depósito do conhecimento científico antigo que foi a Biblioteca de Alexandria (69), ao ler um papiro antigo, descobriu um registo muito curioso: uma vez por ano, a 21 de Junho (solstício de Verão), ao meio dia, na região de Siena (actual Assuão), os raios solares incidiam exactamente na perpendicular num poço, e uma vara colocada verticalmente no chão não tinha sombra.

Se Eratóstenes fosse um homem vulgar, ao ler este relato teria certamente achado interessante esse facto, mas pouco ou nada teria extraído dele. Afinal trata-se de coisas triviais: poços, varas, sombras de varas, etc. Mas Eratóstenes tinha um **espírito científico**, e a leitura desse papiro suscitou-lhe a curiosidade de conhecer mais. Seria que os raios solares incidiriam perpendicularmente também em Alexandria nesse mesmo dia do ano? Se a Terra fosse plana, como então se supunha, a resposta deveria ser afirmativa. Mas Eratóstenes não se contentou com suposições. E foi observar. Viu, então, que no mesmo dia (21 de Junho) em que os raios solares incidiam perpendicularmente em Siena, incidiam obliquamente em Alexandria, já que, nesta cidade, uma vara vertical produzia sombra.

Este facto só podia ter uma explicação: *a superfície da Terra era curva.*

Mas Eratóstenes não se satisfaz com a explicação. Se a Terra era redonda, sê-lo-ia muito ou pouco? Qual seria o seu raio?

Foi então que Eratóstenes tratou de reunir os dados necessários para resolver o problema. Mediu a altura do Sol em Alexandria a 21 de Junho. Essa altura era $82,8^\circ$ - uma diferença de $7,2^\circ$ em relação a Alexandria. Isso significava que as varas verticais em Alexandria e em Siena, e, consequentemente, os raios da Terra passando por estas localidades, deveriam formar entre si um ângulo de $7,2^\circ$.



Como uma circunferência tem 360° , uma volta completa à Terra deveria ser $360^\circ / 7,2^\circ$ ou seja 50 vezes maior que a distância de Alexandria a Siena...

Bastava saber a distância de Alexandria a Siena para que, por uma simples multiplicação por 50, ele obtivesse o perímetro da Terra (70).

Esta investigação é mais um exemplo paradigmático de como se constrói o conhecimento do mundo físico. Os instrumentos são fundamentalmente dois: os **órgãos dos sentidos** e a **inteligência**. O pensamento, aliado aos sentimentos, às emoções e à acção, estão na base da construção da Ciência. Neste exemplo vemos ao mesmo tempo a ideia e a verificação experimental, o pensamento e a acção.

3.10.7 Características dos modelos científicos que prevalecem e os obstáculos epistemológicos que se levantam à mudança conceptual

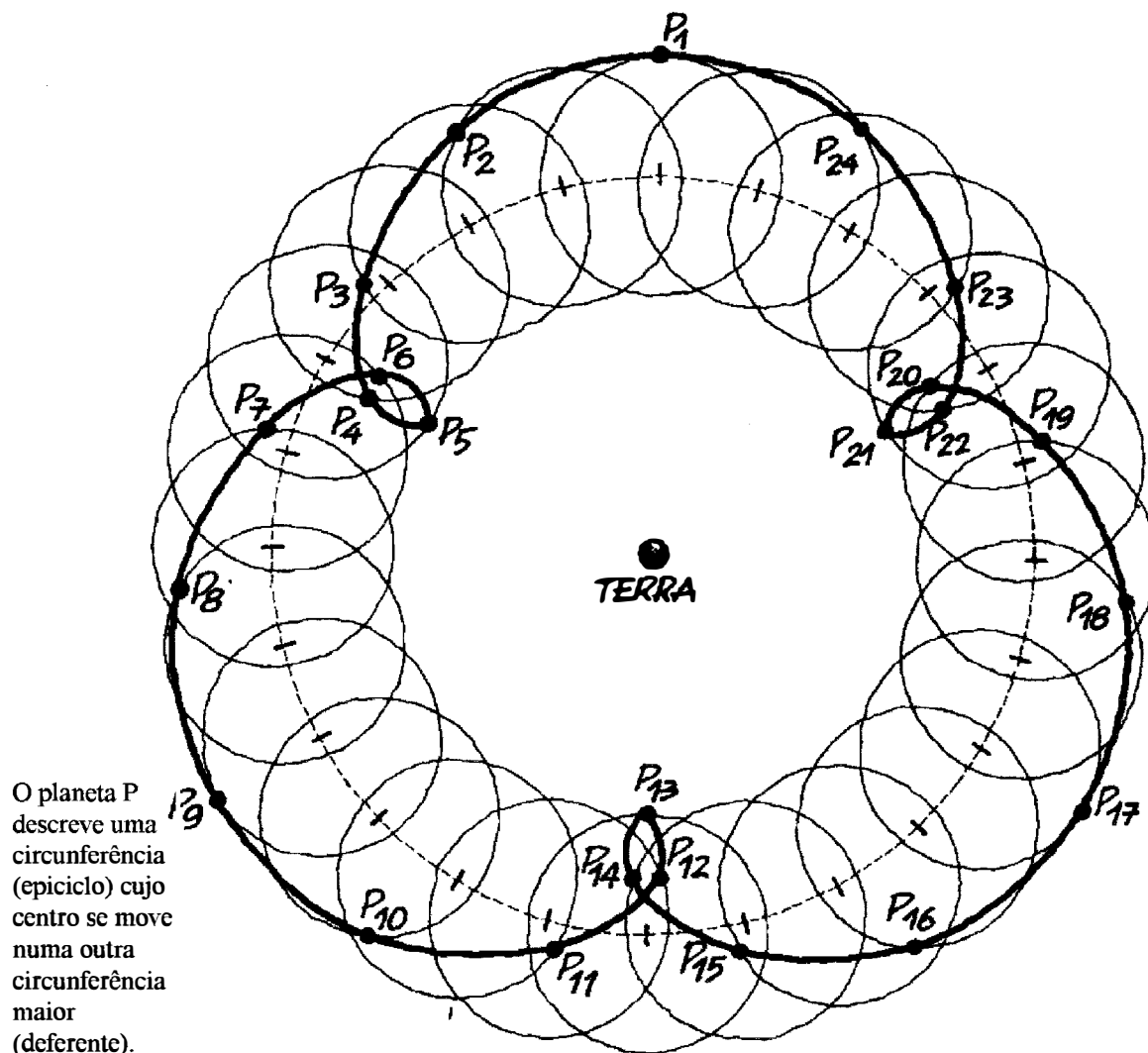
O filósofo, matemático, astrónomo, geógrafo, médico e legislador **Eudóxio** (408-355) foi considerado o maior precursor de Euclides e o primeiro a desenvolver um modelo quantitativo dos astros. Era um modelo geocêntrico, mas dotado de uma **característica decisiva de um modelo científico: o poder de previsão**. O modelo de Eudóxio tinha esse poder: previa os eclipses com uma margem de erro muito razoável para a época.

Por sua vez, Aristarco de Samos (310-230), um astrónomo dotado de uma intuição excepcional, afirmou que a Terra se move em torno do Sol ao mesmo tempo que roda em torno de um eixo de simetria. Porque tal modelo era contrário ao senso comum, comandado por uma sensibilidade geocêntrica intrínseca, o modelo heliocêntrico de Aristarco foi rejeitado e Aristarco acusado de impiedade...

Ao longo da Idade Média as concepções físicas e cosmológicas básicas de Aristóteles, alicerçadas no geocentrismo, embora discutidas pontualmente aqui e acolá, mantiveram-se praticamente intactas. Havia um **modelo geocêntrico e positivista** de Universo, o qual tinha sido expresso numa obra em 13 volumes, o «*Almagesto*», por Cláudio **Ptolomeu** de Alexandria (ano II d. C.). Este modelo pretendia, de acordo com a sua designação, traduzir «*a Grande Composição*» do Universo, de acordo com as observações astronómicas.

O sistema de Ptolomeu perdurou mais de 14 séculos. E porquê?

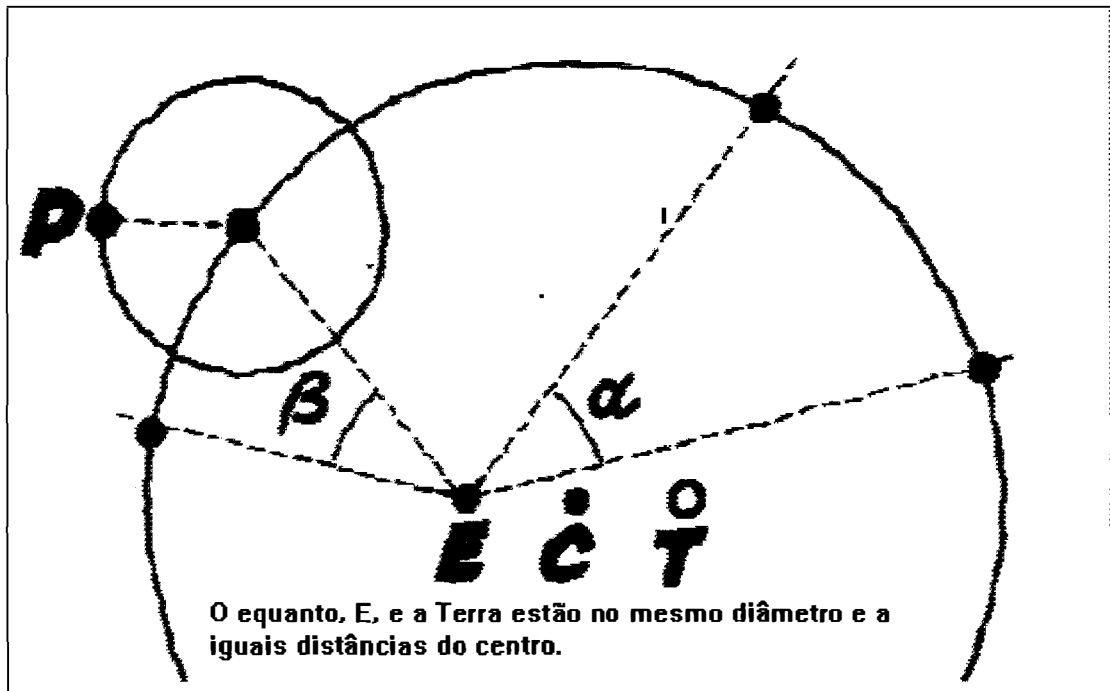
Por um lado, porque não colidia com a doutrina aristotélica. Por outro lado, porque, graças à introdução de determinados artificios chamados *epiciclos*, *deferentes* e *equantos*, o modelo possuía algumas características que o tornaram duradouro.



Essas características que o tornavam duradouro eram:

- estava em sintonia com o senso comum (Terra imóvel e todos os astros a girar à volta da Terra) ;
- estava conforme com as opções metafísicas da maioria dos pensadores daquela época;
- permitia prever acontecimentos astronómicos com uma aproximação suficiente, tendo em conta os erros cometidos nessa época nas observações astronómicas;

- era um modelo bastante flexível, pois podia facilmente readaptar-se, introduzindo correcções à medida que a exactidão das medidas ia aumentando.



Este último aspecto de um modelo científico ser flexível é importante, pois permite-lhe readaptar-se à medida que novos dados empíricos vão surgindo.

Um outro aspecto decisivo na evolução do conhecimento científico é este: existem «obstáculos epistemológicos», autênticas barreiras do pensamento científico à evolução desse mesmo pensamento científico. Aqui reside, como veremos, uma das grandes analogias entre o desenvolvimento do conhecimento ao longo da história e a evolução do conhecimento pessoal, já que também neste surgem diversos «obstáculos epistemológicos» (no sentido de Bachelard).

Um dos obstáculos epistemológicos com que se depara um estudante ao analisar um fenómeno é o próprio pensamento vulgar que ele possui, que usa no dia a dia, na fase em que ele ainda não elaborou suficientemente o seu conhecimento científico sobre esse fenómeno.

De modo semelhante, a Ciência, como se de uma mente viva em formação se tratasse, encontrou sempre grandes obstáculos epistemológicos, nas fases de mudança de paradigmas.

Assim sucedeu, por exemplo, no que respeita à manutenção de ideias geocêntricas, quando a Ciência ainda não tinha construído a ideia de inércia. A ideia de inércia (e o princípio a ela associada) foi a chave que abriu as portas ao heliocentrismo como doutrina suficientemente fundamentada.

Havia problemas absolutamente sem resposta quando se pretendia fundamentar o heliocentrismo e que só adquiriram resposta com o princípio da inércia, **problemas** do tipo:

- porque é que um corpo lançado ao ar a partir de um ponto da Terra não cai num outro ponto da Terra situado atrás daquele em que foi lançado (atrás, relativamente ao sentido do movimento da Terra)?;
- porque é que um pássaro que avista um verme no solo e voa verticalmente para ele não vê o verme fugir-lhe para a frente com a Terra?

Esses obstáculos epistemológicos vinham de longa data, pois já **Aristóteles** os tinha levantado na sua obra «*Sobre os céus*». Mas, lenta e dificilmente, a Ciência foi evoluindo e ultrapassando esses e outros obstáculos.

3.10.8 As contradições teóricas dos modelos estão na base da mudança conceptual

O processo de conhecimento de um objecto, de acordo com o **pensamento aristotélico-tomista** (71) é um processo que funciona por **abstracção de conceitos a partir de dados**. A partir da percepção sensível, o entendimento faz sobressair os aspectos essenciais, a **essência**, ocorrendo uma apropriação do todo, do universal, do conceito; só depois há um reconhecimento das características particulares e individuais (primeiro reconhecemos a mulher e depois é que reconhecemos uma determinada mulher).

O progresso científico sempre se baseou também na confrontação de argumentações. E uma teoria que cai é como um barco que começa a afundar-se: começa a «meter água» pelo ponto mais fraco. Descobrem-se os pontos mais fracos, as **contradições** mais flagrantes, numa teoria, e aí começa a nascer o germe de uma nova teoria. Foi o que aconteceu com a teoria aristotélica que começou a ceder pelos seus pontos mais fracos, como vamos ver.

A crise do pensamento escolástico iniciou-se no século XIV, com o aparecimento do **pensamento nominalista**, que contestou as mais importantes ideias do pensamento filosófico-cristão.

Em lugar de um mundo de essências, os nominalistas só vêem um **mundo de seres individuais**. A **ordem do Universo** é, segundo eles, gratuita, puramente **fáctica**, **contingente**.

Para **Ockham**, o representante máximo do nominalismo, **os sentidos percebem e o entendimento conhece intuitivamente** os objectos. Para ele, a **intuição intelectual é fundamental** na construção do conhecimento. Através dela, não só conhecemos as realidades individuais como as conexões entre elas. Os **conceitos** não são mais do que **signos** linguísticos.

Nicolau de **Oresme** (1320-1382), um nominalista da escola de Paris, fez um comentário crítico sobre a obra *«Dos Céus»* de Aristóteles, onde mostrou a possibilidade de haver alternativas para diversas interpretações aristotélicas. Um exemplo: Aristóteles havia refutado a explicação de Heraclides, o Pitagórico, para o movimento da esfera celeste, com base na rotação da Terra (situada no centro do Universo) argumentando que nós nos aperceberíamos desse movimento. Nicolau de Oresme, embora acreditando na imobilidade da Terra, criticou a refutação de Aristóteles contra Heraclides, afirmando que só pela fé e não pela razão se podia acreditar na imobilidade da Terra. E argumentou com a relatividade do movimento (72).

Os **nominalistas de Paris**, entre os quais se destaca João **Buridano**, abandonaram completamente a explicação aristotélica do movimento dos projécteis, considerando não ser necessário que a «causa motriz» seja exterior ao móvel. **O movimento do projétil continua porque a «causa motriz» (a mão) imprime ao móvel um ímpeto (*impetus*), uma espécie de causa interna que mantém o movimento.** Acabado o ímpeto, o móvel então, sim, adquire o movimento natural de queda vertical.

Duas observações importantes:

- vemos como **uma explicação nasce de uma contradição, mas ela própria encerra em si contradições**. A grande contradição é esta: o movimento que a teoria do ímpeto permite prever não condiz com a experiência. O ímpeto termina instantaneamente e instantaneamente o corpo deveria assumir um movimento vertical. Há uma descontinuidade que está longe de se verificar na prática (a menos que o projétil embata numa parede impenetrável);
- podemos ver no *ímpeto* o gérme da *força viva*, conceito que mais tarde foi introduzido na Física.

Pontualmente, ainda no período medieval, as leis do movimento de Aristóteles também passaram a ser contestadas com base em métodos experimentais e físico-matemáticos. Assim:

- No século VI, **João Filópono** (ou **João, o Gramático**) deixou cair corpos de pesos diferentes da mesma altura e concluiu que a razão dos tempos requeridos para o movimento não era igual à razão dos pesos (como afirmara Aristóteles), “*mas sim que a diferença dos tempos era muito pequena*” (Cohen, 1988, pp. 23-24). E, adoptando uma atitude científica moderna, afirmou que *um argumento baseado na «observação» vale mais do que «qualquer espécie de argumento verbal»*.

- Guilherme de **Heytesbury** e outros **mertonianos** (discípulos do Merton College de Oxford) começaram a acompanhar um movimento instante a instante e concluíram, por volta de 1335, que *«um corpo cuja velocidade aumenta uniformemente durante um certo intervalo de tempo percorre exactamente a mesma distância que percorreria no mesmo intervalo de tempo se se movesse com uma velocidade constante e igual à que adquire no instante médio do intervalo de tempo»*. O nominalista Nicolau de **Oresme** (1320-1382) chegou à mesma conclusão, mas por um processo geométrico (Cohen, 1988, p. 134).

3.10.9 *As idiossincrasias dos cientistas e a dinâmica do erro na construção da Ciência*

Dois grandes factores impulsionaram, como sabemos, o progresso científico a partir do século XV: as **necessidades de tipo técnico** (melhoria de armamento, navios, navegação, etc.) e a **leitura de grandes obras clássicas dos pensadores gregos**, principalmente de Arquimedes, Pitágoras e Euclides. Os progressos técnicos sempre têm feito progredir a Ciência e vice-versa. E, uma vez mais, as **convicções metafísicas** contribuíram para «rasgar horizontes», por exemplo, a ideia da infinitude do Universo defendida por Nicolau de Cusa, Giordano Bruno e Francis Bacon.

Submetido ao confronto com dados resultantes de observação dos astros cada vez mais exactos, o modelo ptolomaico tinha-se complicado extraordinariamente. No séc. XV já era necessário recorrer a mais de 80 movimentos circulares simultâneos para modelar o movimento dos astros. E, mesmo assim, as previsões do modelo estavam longe de ser correctas.

Inspirado nos princípios da parcimónia e da harmonia com as observações, e movido por uma heliolatria fundamentada em convicções metafísicas (73), Nicolau **Copérnico** propôs um modelo novo, ainda com muitas deficiências e limitações.

Tal como afirma Luís de Albuquerque no prefácio à edição portuguesa da obra «*As revoluções dos orbes celestes*», “o trabalho de Copérnico não esteve isento de limitações, concessões e ambiguidades” (Copérnico, 1984, introdução à edição portuguesa). De facto, se analisarmos essa obra, veremos que Copérnico continuou agarrado ao *estigma platónico do movimento uniforme, circular e perpétuo* (Copérnico, 1984, pp. 25-27) e utilizou muitas vezes uma argumentação de cariz escolástico.

Para além disso, o modelo de Copérnico ainda se revelava bastante complicado (34 círculos), embora muito menos que o de Ptolomeu e tinha a grande deficiência de não se apoiar num suporte físico adequado, o que não permitia a ultrapassagem do obstáculo epistemológico proveniente do senso comum de quem vive numa Terra móvel. E possuía também uma limitação que lhe era imposta à partida por deficiências instrumentais: a não verificação da paralaxe anual das estrelas.

Porém, oferecia diversas vantagens sobre o modelo ptolomaico, e foi com base nelas que se viria a impor. Entre essas vantagens, podemos sintetizar as seguintes:

- ser mais simples, pois o número de esferas necessárias para ajustar o modelo às observações dos astros era consideravelmente menor;
- explicar com mais facilidade o movimento retrógrado dos planetas, esse quebra-cabeças dos astrónomos antigos;
- permitir calcular facilmente, por triangulação, as distâncias dos planetas ao Sol (ver, p. ex. Cohen, 1988, p 63);
- permitir cálculos bastante exactos dos períodos siderais dos planetas;
- em suma, fazer previsões mais exactas, com base em menos premissas à partida e cálculos mais simples.

A maior virtude desse modelo, porém, foi ter conseguido ultrapassar a barreira psicológica do geocentrismo, um dos obstáculos epistemológicos mais difíceis de ultrapassar na história do pensamento.

A revolução copernicana e toda a história que se lhe seguiu é mais um exemplo de que o modo como o conhecimento científico se constrói está ligada à natureza humana dos seus construtores. A Ciência é obra de homens e não de robôs. Por mais que um cientista tente ser objectivo e libertar-se totalmente do estigma do seu ego, não o consegue. Copérnico não foi excepção. Continuou **preso a concepções metafísicas** antigas e usou-as na sua argumentação. E é também um exemplo de como as limitações das técnicas instrumentais condicionam o avanço do conhecimento científico. Ninguém duvide que o aparecimento do telescópio foi vital para esse avanço.

É conhecido o empenho que Kepler e Galileu puseram na defesa da «revolução copernicana». Concordamos inteiramente com Cordon e Martinez que *esse empenho foi estimulado, em grande parte, por convicções metafísicas do tipo platonizante* (1984, 2º vol., pp 52). É notório no seu trabalho um enraizamento da ideia de que “*o harmónico e matematicamente simples não é só o mais belo, mas também o único verdadeiro*” (74).

O período que se iniciou com Copérnico foi um período conturbado na história da evolução do pensamento, porque correspondeu à mudança de um paradigma para um novo paradigma (no sentido de Kuhn).

O astrónomo dinamarquês Tycho Brahe (1546-1601) tentou a *conciliação* entre os dois modelos antitéticos. Com efeito, defendia um modelo que mantinha essencialmente o sistema ptolomaico geocêntrico para a Lua, o Sol e a esfera das estrelas fixas e punha a rodar os outros 5 planetas heliocentricamente. Acontece que o avanço científico não se faz com conciliações mas com **superações**. Pretendemos dizer com este neologismo que não basta pegar em dois sistemas opostos, tirar umas ideias de um e de outro e juntá-las. É necessário uma evolução para um sistema mais avançado numa progressão dialéctica.

Se Copérnico era heliolatra, Kepler não o era menos. Se Copérnico tinha convicções metafísicas que perturbaram a sua investigação, Kepler não tinha menos. Era pitagórico e perdeu uma boa parte da sua vida a tentar associar os seis planetas do sistema de Copérnico (Mercúrio, Vénus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno) com os cinco poliedros regulares dos géometras gregos (tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro). Tinha a honestidade intelectual característica do bom espírito científico e dispôs da bela herança de uma multidão de dados de observação dos astros (principalmente relativos ao planeta Marte). E assim, manuseando esses dados como quem manuseia as pedras de um «puzzle», num trabalho que por vezes mais parecia numerologia, conseguiu atingir as leis dos movimentos dos astros.

A história da Ciência proporciona-nos vários exemplos em que grandes avanços científicos foram obtidos com base em ideias obscuras ou mesmo incorrectas, imprecisões e argumentos caducos. Há toda uma dinâmica histórica em torno do erro, da teoria imperfeita, o que aliás também sucede com o desenvolvimento cognitivo de cada ser humano. O erro gera conflitos conceptuais, seguidas de sínteses dialécticas geradoras de progresso cognitivo. Um exemplo muito sugestivo é o estabelecimento do segundo princípio da Termodinâmica (e do primeiro, também) por Sadi Carnot com base na ideia de calórico, posteriormente abandonada.

Kepler também fornece bons exemplos desta tese. Com efeito, para explicar o movimento não uniforme dos planetas, Kepler reintroduziu velhas ideias ptolomaicas que Copérnico se esforçara por rebater, concretamente o *equanto* (no foco da elipse não ocupado pelo Sol). Deste modo estabeleceu uma interpretação incorrecta. Por outro lado, Kepler, com base na sua lei da fotometria, considerou uma força exercida pelo Sol sobre os planetas inversamente proporcional ao quadrado da distância, o que está certo. Porém, interpretou incorrectamente a atracção e o facto de os planetas terem órbitas quase complanares. Com efeito, segundo ele, a força de atracção, de natureza magnética, actuava apenas no plano da eclíptica segundo uma lei inverso-quadrática e noutras direcções de modo diferente.

A metodologia que Kepler adoptou no estabelecimento das leis planetárias está longe de ser um modelo de perfeição. Basta notar que Kepler chegou à lei das áreas ainda antes de ter mostrado que as órbitas dos planetas são elipses (Cohen, 1988, p. 180).

Parece, pois, haver algum fundamento para o facto de Galileu ter praticamente ignorado a obra de Kepler. Como prestar grande atenção a uma obra escrita de modo exotérico onde se misturavam as grandezas numéricas referentes aos planetas com escalas melódicas?! No entanto, as conclusões de Kepler (e essas é que são importantes!) vieram a revelar-se decisivas para que Newton conseguisse efectuar a sua grande síntese no quadro conceptual da Física.

3.10.10 As grandes antíteses metodológicas na reflexão histórica sobre a Ciência

Não se pode negar a Bacon o mérito de ter combatido a atitude anti-científica do aristotelismo da sua época, porque, segundo ele, desprezava o papel da experimentação e o valor da indução na evolução do conhecimento científico. A indução aristotélica é, no dizer de Bacon, *nem sistemática nem rigorosa*. Não é sistemática, porque a recolha de dados é efectuada sem qualquer critério, sem distinguir quais são os factores condicionantes dos fenómenos que são mais importantes e menos importantes. E não é rigorosa porque extrai conclusões com demasiada ligeireza, só considerando muitas vezes casos que são favoráveis à conclusão geral e não tendo em conta os casos que são desfavoráveis a essa conclusão.

A designação de «**método**» **empírico-indutivista**» para a metodologia que Francis **Bacon** (1561-1626) preconizou na sua obra «*Novum Organon*» é, quanto a nós, enganadora, pois poderá conduzir a uma ideia deturpada acerca do seu pensamento.

Bacon defendia, tal como Aristóteles, que o conhecimento do mundo físico envolve uma fase indutiva onde são estabelecidos princípios gerais a partir da observação dos fenómenos, e uma fase dedutiva, propiciadora de conclusões a partir desses princípios gerais. O que Bacon criticou foi o facto de os aristotélicos privilegiarem a dedução à indução, procurando adoptar uma lógica para a primeira, mas não para a segunda. O objectivo fundamental de Bacon era formular uma **lógica da indução** (Cordon e Martinez, 1987, 2º vol., p. 38), com base em «tábuas» (de presença, de ausência e de graus) e em regras, que nos resguardasse contra as noções falsas. Bacon achava que a indução deveria ser mais rigorosa e sistemática por ser mais importante que a dedução. Mas julgamo-lo ciente de que a metodologia científica não se assemelha a amontoar e compilar dados de acordo com tábuas (75). É verdade que ele não tomou consciência do papel da imaginação e da intuição científica na elaboração de hipóteses, nem tão pouco da importância da Matemática como ferramenta conceptual. Porém, é exagero pensar-se que não tinha consciência alguma da importância da dedução como antítese da indução.

Um outro grande filósofo e cientista que se preocupou com a metodologia da Ciência foi **Descartes**. O «**método analítico-sintético**» cartesiano tem, como já dissemos, uma *inspiração matemática* (a Matemática sempre fascinou Descartes e dessa paixão ainda hoje beneficiamos muito). Tal como na Matemática, o conhecimento da Natureza deverá ser deduzido a partir de afirmações claramente indubitáveis, passo a passo, sendo cada passo evidente (76).

Do mesmo modo que um problema matemático complexo exige uma análise e atomização em pequenas evidências simples, e, depois, a reconstituição da solução do problema complexo a partir de uma síntese dessas evidências simples, todo o conhecimento do mundo se deve basear num processo de *análise* (conducente aos elementos simples, às naturezas simples) e de *síntese* (reconstrução dedutiva do complexo a partir do simples).

A *análise* e a *síntese* são processos complementares de um “método” que estabelece um fluxo reversível entre o complexo e o simples, o antecedente e o consequente, a hipótese e a tese, o efeito e a causa.

O “método” cartesiano é **racional** porque assenta nas ideias trabalhadas pelo pensamento. Uma vez que compreende uma fase analítica e uma fase sintética poder-se-á ver nele um duplo fluxo indutivo (correspondente à análise) e dedutivo (correspondente à síntese). Mas a verdade é que Descartes, como matemático que era, privilegiou enormemente a dedução em desfavor da indução. Podemos, portanto, considerar a metodologia cartesiana eminentemente dedutiva, «matemática», demonstrativa, e tal facto transparece em toda a influência que teve em pensadores como **Espinoza e Leibniz**.

Espinoza, por exemplo, pretendeu demonstrar a ordem total da realidade partindo de certos axiomas e definições matemáticas em *«Ética demonstrada segundo a ordem geométrica»* (Cordon e Martinez, 1984, 2º vol., pp. 83-85).

Tal como **Descartes**, também **Pascal** atribuía **grande importância à intuição** como fonte autónoma de conhecimento. É célebre a sua máxima : “*o coração tem as suas razões que a razão não conhece.*”

Mas, pelo contrário, **Espinoza e Leibniz não atribuíam qualquer importância à intuição** como forma de conhecimento.

Os empiristas **Locke e Berkeley** admitem, tal como o racionalista Descartes, a **importância da intuição** no processo do conhecimento. Só que, relativamente ao conhecimento não intuitivo defendem **métodos empíricos** porque acreditam que todo o nosso conhecimento provém das sensações objectivas. As nossas ideias científicas, simples ou complexas, resultam em última análise dos sentidos. O nosso conhecimento está como que atomizado. Os sentidos, actuando passivamente em conjunto com o entendimento, fornecem-nos as ideias simples, que são como que os átomos de conhecimento. O entendimento depois actua sobre essas ideias e relaciona-as para criar as ideias complexas.

Em suma:

Os empiristas só preconizam para a Física métodos que partem da experiência, natural ou provocada (experimentação), desvalorizando o poder apriorístico da razão (77).

3.10.11 A superação metodológica na «Filosofia Natural» de Galileu e Newton

Galileu tornou-se adepto do sistema de Copérnico em 1597. Ainda antes de possuir a luneta astronómica observou, em 1604, uma nova estrela (na realidade uma *supernova*) na constelação da Serpente. Galileu verificou que ela se encontra no mundo supra-lunar, já que não apresentava paralaxe detectável. Esta observação, conjuntamente com a que Tycho Brahe tinha feito, de outra supernova, em 1572, na constelação da Cassiopeia, *vinha mostrar que o mundo supra-lunar não era imutável, como afirmara Aristóteles.*

Já com a sua famosa luneta, Galileu observou a superfície lunar, que se afigurava como uma paisagem terrestre inóspita. A Lua não era, afinal, aquele astro «*polido e perfeitamente esférico*», como pensavam os filósofos escolásticos.

Verificou igualmente que a superfície escura da Lua apresentava uma zona brilhante proveniente da reflexão da luz terrestre e assim concluiu que, afinal, a Terra também brilhava e não apenas a Lua.

Tudo apontava no sentido da hipótese de que a Terra e os restantes planetas faziam parte de um mesmo cortejo de astros que, a exemplo da Lua, reflectiam a luz do Sol (até então ainda havia grandes dúvidas acerca da possibilidade de os planetas emitirem luz própria).

Galileu impressionou-se com as «*miríades de estrelas*» nunca vistas que povoavam o firmamento, e observou quatro «estrelas dos Médicis», na realidade os quatro primeiros satélites de Júpiter. Era a prova de que nem todos os astros giravam em torno da Terra, como afirmavam os peripatéticos.

Outra descoberta fundamental de Galileu, absolutamente inexplicável com o modelo geocêntrico, foi a das *fases de Vénus*. Se havia uma «Vénus cheia», esse planeta teria de estar em *conjunção superior**, o que era absolutamente impossível no modelo de Ptolomeu.

Galileu observou, ainda, que Saturno mudava a sua forma, mas não conseguiu explicar porquê (essa observação devia-se ao facto de apontar a luneta para o planeta com os seus anéis em posições diversas, mas a luneta de Galileu não permitia a resolução dos anéis). De qualquer modo esta observação, e mais a das manchas solares que também fez, constituíam mais umas provas evidentes de que os astros do mundo supra-lunar não são imutáveis (Galileo-Kepler, 1984, pp. 53-55, pp.67-90, pp. 158- 177).

Se Galileu se tivesse cingido a observar factos com a luneta, pouco teria avançado em termos de metodologia relativamente a Aristóteles. Este também observava factos, só que, infelizmente para ele, sem a luneta que ainda não existia. O contributo de Galileu foi muito maior do que o de Aristóteles porque foi capaz de lidar com a Ciência de acordo com a natureza desta. **A Ciência é muito mais do que a recolha de factos. Ela exige uma teorização com base nos factos e exige uma reflexão não holística dos fenómenos.** Ora, nestes aspectos, foi grande a diferença entre Galileu e Aristóteles:

- **Aristóteles** teorizava problematizando as causas e procurando respostas metafísicas para elas. Considerava holisticamente todos os factores que intervêm no fenómeno a estudar sem desprezar qualquer deles e, como tal, não conseguia transformar esses factores em variáveis matemáticas e analisar matematicamente o fenómeno, até porque não acreditava na estrutura matemática do Universo.

Galileu, pelo contrário, teorizava sem se preocupar com as *causas* metafísicas dos fenómenos (porque há montanhas na Lua?, porque é que há satélites a girar à roda de Júpiter?) e desprezava os factores irrelevantes que não conseguia matematizar. Acreditava piamente na matematização da realidade (a Natureza era, segundo ele, um livro aberto escrito em caracteres matemáticos), traduzia as imagens geométricas figurativas em grandezas físicas, procurando obter a *descrição* dos fenómenos em termos de proposições e relações matematicamente válidas. No caso das montanhas da Lua, Galileu tratou logo de determinar como seriam elas, se altas ou baixas e conseguiu medir a sua altura. No caso dos satélites de Júpiter procurou logo verificar como se moviam, quais os seus períodos (78).

Em conclusão:

Galileu dava toda a primazia às propriedades físicas (quantidades mensuráveis) e não às causas metafísicas (propriedades ocultas). E envolveu-se totalmente numa **dialéctica entre raciocínio e experimentação**: a queda livre relacionada com a queda no plano; experiência com queda no plano; a queda do plano relacionada com o movimento do pêndulo; a experiência com o pêndulo, etc. O seu trabalho é a prova de que a razão dirige a observação e a observação influencia e confirma os juízos da razão (79).

Com uma intuição do que era essencial e do caminho correcto, resolvendo do melhor modo os problemas e dificuldades que iam surgindo, matematizando as propriedades essenciais, construindo e verificando hipóteses, mesmo com experiências conceptuais, Galileu desenvolveu muito o conhecimento físico. Se lhe perguntassem qual o «método» que adoptou, nem ele seria capaz de o traduzir em esquemas simples - uma metodologia baseada numa boa intuição, certamente muita imaginação, um óptimo raciocínio matemático, e boa capacidade de argumentação.

E nada mais é necessário dizer sobre a metodologia de Galileu, que é tudo menos a aplicação do «método» preconizado pelo filósofo seu contemporâneo Roger Bacon (1561-1626). Este famoso «método», porém, impôs-se de tal modo na história do pensamento filosófico que influenciou e influencia ainda a Filosofia da Ciência e o ensino desta. Por isso, e só por isso, nos referimos a um *pretensão* «método» experimental, indutivo, de inspiração baconiana, que dizem Galileu ter introduzido na Física para descobrir factos científicos (método esse que nos dispensamos de descrever), sendo certo que com um «método» tão linear e taxativo como esse nunca ninguém construiu ou construirá ciência alguma...

Ao contrário de Galileu, **Newton** tentou separar claramente o pensamento matemático do pensamento físico, apesar de a sua obra mais famosa, «*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*», uma das mais altas criações no campo da Física, ter toda a estrutura formal de um livro de geometria euclideana (com definições, axiomas, lemas, teoremas, problemas e escólios).

A **Matemática** proporcionava-lhe uma **ferramenta** que ele usava com mestria **para raciocinar hipotético-dedutivamente e resolver os mais variados problemas**, correspondessem ou não a situações reais. Servia-se dela como um bom romancista se serve das palavras. O romancista serve-se dos signos linguísticos para descrever a acção do romance. Newton servia-se dos signos matemáticos para descrever os fenómenos da Natureza. Mas Newton foi mais além, já que raciocinava muitas vezes em termos puramente especulativos, demonstrando as mais variadas proposições matemáticas. Assim, por exemplo, no livro I da 3ª edição dos «*Principia*» (80), Newton deduziu quais seriam as leis de força central, dirigida para o foco, em movimentos elípticos, hiperbólicos e parabólicos e a lei da força dirigida para um ponto qualquer num movimento circular. Considerou as mais variadas situações de movimentos curvilíneos referentes a diversas leis de força e os tipos de órbitas nas quais os corpos se moveriam sob a acção de qualquer tipo de força e não apenas sujeitos a uma força inverso-quadrática. Não estava, nessa fase da sua obra, preocupado em reproduzir qualquer situação física particular, por exemplo, o movimento dos planetas (só o fez no 3º e último livro, «*o Sistema do mundo*»).

A Física era para Newton uma **filosofia da Natureza**. Como filosofia natural que era, tinha a sua **parte demonstrativa** (onde a Matemática intervinha de modo eficaz e, se essa ferramenta lhe faltava, ele construía-a), mas também tinha a sua **parte especulativa**.

Dissertemos um pouco na metodologia usada por Newton para estabelecer a sua célebre síntese entre a Física celeste e a Física terrestre. Há várias obras que contam a história da descoberta da lei da gravitação universal, com mais ou menos pormenor, baseando-se em relatos do próprio Newton. Uma é da autoria do seu melhor biógrafo, Richard Westfall (1988). Outra dessas obras é um célebre curso americano de Física, parcialmente traduzido para português, o «*Projecto de Física*» (unidade 2, pp. 91 a 115). Não vamos aqui reproduzir essa história, até porque ela é bem conhecida. Vamos apenas focar algumas partes da história para as podermos analisar e tirar conclusões sobre a metodologia newtoniana.

A parte interessante da história da descoberta da gravitação universal começa pela lenda da maçã, que foi contada por um dos seus primeiros biógrafos e amigo pessoal de Newton, William Stukeley, e que teria ocorrido por baixo de uma macieira de uma pacata quinta de Lincolnshire. Teria sido neste ambiente bucólico que Newton, em «atitude contemplativa», ao ver cair uma maçã, se teria interrogado por que razão a maçã cai sempre para baixo na direcção do centro da Terra, e não para o lado ou para cima. E teria sido aí que Newton começou a pensar que a gravidade se estende à órbita da Lua.

O aspecto importante deste episódio é este: há muitas pessoas que viram maçãs a cair antes de Newton, no tempo dele e depois dele. É um facto vulgar do dia a dia, faz parte dos nossos hábitos ver cair corpos. Que tinha Newton que outros homens não têm para um facto vulgar o despertar para a sua maior investigação? Uma «*atitude contemplativa*», afirma o seu biógrafo. Essa atitude caracteriza o **espírito científico** a que já nos referimos, o qual é curioso, ávido de querer entender o mundo que o cerca, problematizando por tudo e por nada.

Newton escreveu a certa altura (Projecto de Física, vol. 2, p. 94): “*comecei a pensar que a gravidade terrestre se estendia até à órbita da Lua...*”. A isto chama-se uma **hipótese**. As hipóteses são **fundamentais** na Ciência. São elas que encaminham o nosso pensamento (81). Newton, como todos os grandes cientistas, baseava-se em hipóteses.

Mas não é verdade que Newton teria afirmado orgulhosamente «*hypotheses non fingo*»? Tem havido uma grande deturpação do sentido desta célebre afirmação de Newton. O que ela significa é apenas isto: «*Não mistifico hipóteses*». Quer dizer, Newton tinha a consciência de que fazia hipóteses. O que sucede é que não gostava de fazer hipóteses que a sua intuição e/ou o seu raciocínio vissem à partida que eram altamente duvidosas. Não será uma influência da dúvida metódica cartesiana?

Na realidade, Newton baseou o seu trabalho em nada mais nada menos do que **três tipos de hipóteses**:

- *mecânicas* - três claríssimos “*axiomas*” (expressão do próprio Newton), as três famosas **leis newtonianas** do movimento;
- *metafísicas* - o **espaço** e o **tempo** absoluto (escólio ao 1º capítulo dos “*Principia*”) que resultam de uma espécie de *intuição teológica*;
- *metodológicas*- o **princípio de parcimónia** ou «**espada de Ockam**» (resultante da fé na simplicidade), o **princípio de causalidade** (os mesmos efeitos naturais têm as mesmas causas naturais), o **princípio de indução** (utilizado para passar *do particular ao geral*, por exemplo da explicação do movimento dos planetas à explicação do movimento de todos os corpos sujeitos a forças centrais), e o **princípio de transdução** (utilizado para passar *do geral ao universal*, por exemplo para passar da validade da lei da gravitação sobre os corpos terrestres e sobre a Lua para a validade universal da mesma lei).

A primeira hipótese metodológica, a «*espada de Ockam*», é uma «bússola» que tem orientado sempre a investigação do mundo. Foi enunciada por Newton nos seguintes termos: “*a Natureza nada faz em vão, e é feito inutilmente o que é feito mediante muitas causas, podendo realizar-se com menos. A Natureza é, de facto, simples e não faz alarde de causas supérfluas.*”

Alguns cientistas mostraram-se desconfiados relativamente a ela. Mas não a abandonaram (82).

A segunda regra metodológica é um princípio fundamental da Lógica, o *princípio da causalidade*, e foi enunciado por Newton do seguinte modo: “*efeitos naturais do mesmo género têm as mesmas causas.*” Como o mundo seria irracional e incompreensível se a queda de uma maçã em Portugal tivesse uma causa natural diferente da queda da maçã na China!

O terceiro princípio, em linguagem actual, é este: *se determinadas propriedades foram provadas experimentalmente para determinados objectos com os quais experimentámos, devem ser também consideradas válidas para todos os objectos iguais com os quais nos foi impossível contactar.* Ininteligível seria o mundo se assim não fosse!

Este princípio é um princípio de *indução*, pois permite-nos generalizar de um número pequeno e particular de casos estudados para todos os casos iguais.

A quarta e última regra metodológica pode enunciar-se assim: *na ciência experimental as hipóteses ou generalizações que se fazem a partir da experiência devem ser consideradas verdadeiras enquanto não houver evidência adicional de que outras hipóteses derivadas ou não dessas são mais exactas.* Quer dizer: o que é estabelecido experimentalmente tem muita força.

Quem olhar Newton apenas à imagem destas regras metodológicas ficará porventura com uma noção errada acerca do seu pensamento: a de que se trata de um cientista que só valorizou a indução, em desfavor da dedução, a síntese em desfavor da análise, a experiência em desfavor do raciocínio. Não é o caso. **Newton era tão dedutivo quanto indutivo, e o seu espírito era tão analítico quanto sintético.** Newton utilizava naturalmente a dialética. Por isso é que foi Newton. Caso contrário não passaria de mais um filósofo empírico-indutivista com mais ou menos valor. Os «*Principia*» estão escritos com longas argumentações hipotético-dedutivas de cariz geométrico. Ora a geometria não é propriamente uma ciência indutiva!

As regras metodológicas de Newton não são mais do que um guia para construir hipóteses de trabalho. São uma ferramenta que ajuda à construção de boas hipóteses, as mais simples, as mais generalizáveis, tão fundamentadas na experiência quanto possível e enquanto não existirem outras hipóteses melhores. Com as regras rejeitam-se as hipóteses não científicas, mistificadoras, na construção do conhecimento científico. Porém, **o processo do conhecimento é muito mais do que construir hipóteses.** Portanto, **as regras não têm nem podem ter a pretensão de constituir um método de construção do conhecimento científico.**

Vamos referir ainda um aspecto importante que vem a propósito de Newton. Este nasceu em 1642, e em 1662 foi fundada a «*Royal Society of London for Improving Natural Knowledge*», de que ele viria a ser presidente. A «*Royal Society*» é uma sociedade científica. As sociedades científicas sempre se revelaram focos de desenvolvimento do saber. A construção da Ciência exige dinheiro e diálogo. As sociedades científicas têm mais força do que os cientistas individualmente para obter subsídios destinados ao fomento de conferências e à publicação de revistas científicas através das quais se trocam experiências, se discute e os membros da comunidade científica aprendem uns com os outros.

A Ciência não é obra de ninguém em particular, mas de uma comunidade social. Ninguém isolado, nem que fosse igual a Newton (o que é difícil, não só pela sua inteligência como, principalmente, pelas suas idiossincrasias...), conseguiria produzir conhecimento científico válido. As sociedades científicas, são, portanto, organizações que qualquer governo com um mínimo de vontade de fomentar a Ciência deve apoiar.

Finalmente, e ainda a propósito de Newton, vamos referir outro aspecto importante da construção das ciências físicas. Trata-se da **minúcia**, da **preocupação do pormenor**, do **controlo de todas as possíveis causas de erro** inerente ao trabalho científico. Este aspecto também se ilustra facilmente com Newton.

Com efeito, Newton confrontou-se com o problema de medir as distâncias entre os astros. Quando se fala em distância da Lua à Terra, é a distância entre as superfícies da Terra e da Lua ou a distância entre os centros? Estas distâncias não diferem mais do que 2%. Porém, este foi um dos problemas que fez com que Newton atrasasse a publicação do seu trabalho vários anos (segundo alguns historiadores). Porque Newton, como qualquer outro homem de bom **espírito científico**, pretendia apresentar uma teoria o mais rigorosa e com o mínimo de pontos fracos que fosse possível.

Em síntese:

O espírito científico de Newton conseguiu ultrapassar e não se preocupar com a questão metafísica acerca do fenómeno movimento (porque há o movimento?), e foi ainda mais longe que outros que apenas resolveram a questão meramente geométrica, cinemática, descritiva (como decorre cada movimento?). Conseguiu responder à pergunta física (como se interpreta, em termos de forças, cada um dos movimentos?).

A sua **metodologia** é uma vez mais uma **dialéctica entre observação experimental e razão**, onde **análise e síntese, indução e dedução**, andam a todo o momento envolvidas.

Na história da lei da atracção universal vemos aparecer um enredo com *conhecimento empírico anterior, hipóteses de trabalho, indução, transdução, dedução, previsão, confirmação de previsão*. Ao fim e ao cabo, a teoria newtoniana da gravitação constitui uma «**superação**» relativamente às teorias anteriores (a de Descartes, qualitativa, confusa, com estranhos redemoinhos em fluidos invisíveis, ou a de Kepler, geométrica, com uma estranha e mística acção magnética). Mas, como toda a construção humana, tem pontos fracos. E, por isso, foi «**superada**» mais tarde.

3.10.12 A Ciência procura a generalização conceptual a caminho de um modelo de estrutura racional do mundo

Influenciado por Newton, **Kant** considerava como fontes do conhecimento a *sensibilidade*, por meio da qual recebemos as impressões do meio exterior, e o *entendimento*, através do qual produzimos transcendentemente os conceitos e as ideias, *sem os derivar da experiência*. Só que estes conceitos e ideias apenas são válidos no estrito domínio da experiência.

Kant atribuía **grande importância à intuição pura**, através da qual nos apropriamos aprioristicamente de ideias como a do espaço absoluto e a do tempo absoluto. Não há nenhuma evidência empírica da existência do espaço e do tempo absolutos. Porém, a intuição de Newton conduziu-o a admitir a sua realidade.

Em contrapartida, Kant **desprezava totalmente a intuição sensível**, isto é, a apropriação imediata do significado de um objecto a partir dos dados empíricos, sem serem trabalhados pela razão. Os dados empíricos têm de ser elaborados conceptualmente para que se produza o conhecimento do objecto. Posição semelhante a esta tinham os intelectualistas medievais e os racionalistas modernos.

Segundo Kant, quando não conseguimos referir a conceitos as impressões sensíveis provenientes de um objecto, não conhecemos esse objecto. Apenas compreendemos um objecto ou fenómeno físico se o referirmos a conceitos. Como é que o referimos a conceitos? Através de afirmações cientificamente correctas. Assim, por exemplo, como conhecemos uma nuvem? Referindo-a a conceitos por meio de afirmações que a Ciência aceita: a nuvem tem gotas (conceito) de água (outro conceito).

Os **conceitos** são de dois tipos: os **puros**, vazios de conteúdo empírico (a que Kant chamava categorias), e os **empíricos**. Os conceitos puros (totalidade, pluralidade, unidade, realidade, negação, causa, existência, etc.) são condições transcendentais *sine qua non* do nosso conhecimento. Mas não têm aplicação válida para além dos fenómenos.

De acordo com Kant, através do conhecimento procuramos encontrar juízos cada vez mais gerais, susceptíveis de abarcar uma multiplicidade de afirmações particulares e servir de fundamento a estas. **A Ciência constrói-se abarcando em afirmações cada vez mais gerais as estruturas conceptuais de campos específicos.**

Assim, por exemplo, com Aristóteles tínhamos leis para os movimentos celestes e leis para os movimentos terrestres, naturais e violentos. Galileu já conseguiu afirmações mais gerais que abarcavam os movimentos terrestres num mesmo quadro conceptual, mas não atingiu a síntese entre os movimentos terrestres e celestes. Com Newton atingimos leis mais gerais ainda, dizendo respeito ao mesmo tempo aos movimentos celestes e terrestres.

Quanto mais caminhamos no sentido de englobar num mesmo quadro conceptual explicativo fenómenos distintos, mais aumenta a confiança nesse mesmo quadro conceptual explicativo. O que motivou Einstein a generalizar a Teoria da Relatividade Restrita (TRR) construindo a Teoria da Relatividade Geral (TRG)? A TRR era válida para fenómenos ocorridos longe de grandes massas de matéria quando observados em referenciais inerciais. Havia que expandir o quadro

conceptual da Física aos fenómenos ocorridos em fortes campos gravitacionais e observados em referenciais acelerados.

Com as forças fundamentais tem havido também ao longo da história da Física um caminhar para a unificação, passando por modelos cada vez mais abrangentes.

Neste caminhar para um modelo da estrutura racional do mundo, a Ciência procura cumprir à sua maneira o grande objectivo que a antiga Filosofia se propunha atingir. A palavra *Filosofia* significa tendência (*filo*) para a sabedoria (*sofia*), para o saber total.

Hegel entendia ser possível perseguir esse objectivo da **procura do conhecimento total, da estrutura racional do mundo como sistema total**. O mundo, segundo Hegel, não é dissociável em sujeito e em objecto, em *fenómeno* (determinação do mundo no sujeito) e *númeno* (determinação do mundo no objecto), em ser e devir. **O mundo é intrarelacional, autodinâmico, auto-evolutivo**, permanentemente **síntese entre o todo e as suas diversas partes**, em que **a unidade resulta da diferenciação e a diferenciação é comandada pelo todo unitário**. Numa palavra: **é dialéctico**. Nele tudo influencia tudo (Cordon e Martinez, 1984, p. 196). A grande sentença hegeliana é conhecida: *"o verdadeiro é o todo"*. Para Hegel, o conhecimento do mundo tem que estar de acordo com a estrutura dialéctica do mundo e só pode ser obtido através de uma **metodologia dialéctica**.

De um modo essencial e muito resumido, afirmamos que a metodologia de conhecimento do mundo, segundo Hegel:

- assenta numa relação indissociável entre o sujeito cognoscente e o objecto do conhecimento;
- é um processo de desenvolvimento autodinâmico em que sujeito e objecto se «transformam» e em que se tende para uma «identidade» entre ambos;
- há, de certo modo, uma «reconversão» do objecto no sujeito, isto é, é no sujeito cognoscente que se atinge a identidade ou síntese absoluta entre o objecto e o sujeito; trata-se de uma identidade subjectual, isto é, que ocorre no sujeito;

- esta identidade vai-se conseguindo através de um processo ininterrupto de sínteses entre teses e antíteses, mas estes três vocábulos tese, antítese e síntese não podem ser encarados do modo formalista que muitas vezes se faz (83).

É esta concepção de que o objecto é redutível ao sujeito, o ser é redutível ao pensar, que faz de **Hegel** um **idealista absoluto**. Tal como ele escreve no *Prólogo* da sua obra «*Fenomenologia do Espírito*», “só o espiritual é real”.

Os **materialistas dialécticos** valorizam o método dialéctico como forma de conhecer o mundo, que também consideram dialéctico. Porém, ao contrário dos idealistas dialécticos como Hegel, atribuem uma prioridade ontológica à matéria, a sua dialéctica resulta numa dialéctica material e não espiritual.

3.10.13 A Física é uma só, uma ciência teórico-experimental

O século XIX iniciou-se com a criação de uma nova ferramenta poderosa para as ciências físicas: a *pilha eléctrica*. Foi grande o surto de desenvolvimento do conhecimento físico que se seguiu ao aparecimento da pilha eléctrica. Esta propiciou experiências que até então eram impossíveis. E, sempre que o progresso da técnica experimental ocorre, a Ciência progride. Foi o que sucedeu com o Electromagnetismo que não se teria desenvolvido sem a pilha eléctrica.

No entanto, têm sido muito mal contadas algumas das investigações ocorridas no campo de Electromagnetismo, como aliás noutros campos. Já rebatemos a «descoberta por acaso» de Oersted e vamos agora referir-nos ao «*Newton da electricidade*»: Ampère.

O célebre estudo amperiano da «*acção das correntes paralelas*» vai servir-nos para ilustrar uma perspectiva pouco debatida de encarar a construção do conhecimento científico. Como se sabe, quando fazemos passar duas correntes eléctricas suficientemente fortes em dois fios condutores paralelos próximos, eles atraem-se

ou repelem-se consoante os sentidos das correntes. Ampère sentiu a necessidade de se convencer a ele próprio e a toda a gente de que se tratava de um novo fenómeno, um fenómeno electromagnético, e não de um efeito novo de um fenómeno antigo, o electrostático. Para isso:

1º - Fez notar que o efeito é dinâmico e não estático, pois cessa quando se desliga a bateria, ao contrário do efeito electrostático que acontece com corpos não ligados a baterias.

2º - Fez notar, também, que os fios, quando se atraem, têm os extremos ligados aos mesmos pólos da bateria; ora, se na origem do efeito estivesse o velho fenómeno electrostático, os fios repelir-se-iam por estarem carregados com cargas do mesmo sinal.

3º - Fez ainda notar que os fios, quando, ao atraírem-se, tocam um no outro, não se repelem, como sucederia se ficassem carregados electrostaticamente com cargas eléctricas do mesmo sinal.

Um tipo de pensamento com estas características não foi exclusivo de Ampère. Outros grandes físicos começaram por analisar os novos fenómenos que se propuseram estudar de modo semelhante. Arons (1982) designa esta análise fenomenológica que muitos físicos adoptaram por “*pensamento fenomenológico*”, sendo certo que esta designação pouco ou nada tem que ver com a fenomenologia como doutrina filosófica.

Este exemplo de Ampère ilustra uma determinada perspectiva de encarar a construção do conhecimento físico. Poderemos designá-la por **perspectiva fenomenológica** e caracterizá-la do seguinte modo:

- A Física vive dos fenómenos físicos naturais e provocados que surgem com aspectos misteriosos. Há que raciocinar e experimentar com astúcia para concluir acerca dos fenómenos e os destrinçar conceptualmente.

- Há muito de pensamento fenomenológico e qualitativo na construção do conhecimento físico.
- As experiências permitem confrontar ideias novas com ideias anteriormente estabelecidas.
- A Física, mesmo a mais experimental, constrói-se, como vemos por este e muitos outros exemplos que poderíamos dar, com experiências carregadas de raciocínios.

Falámos num *físico experimental* (?). Vamos agora debruçar-nos sobre um *físico teórico* (?). (84).

Algumas das ideias de Einstein acerca da metodologia utilizada na Física são importantes e deixaram marcas. Elas transparecem de um modo muito claro num parágrafo da sua obra «*Como vejo o mundo*» (1981, pp. 145 a 153). Nesse parágrafo, Einstein começa por sugerir, a quem quer estudar os métodos que usa um físico teórico, o seguinte princípio básico: “*não dê crédito algum ao que ele diz, mas julgue aquilo que ele produziu!*”.

Esta afirmação dá logo uma imagem exacta de que não é fácil, diríamos mesmo que é impossível, estereotipar num método todo o tipo de investigação que um físico teórico efectua, muito menos um físico no sentido genérico do termo. Não é possível estabelecer uma sequência de fases que sirva de modelo ao trabalho de todo e qualquer físico.

Uns parágrafos à frente, Einstein faz um justo **elogio aos pensadores racionalistas** da Grécia antiga, porque fizeram nascer a Ciência ocidental. Foi lá que “*pela primeira vez, se inventou a obra-prima do pensamento humano, um sistema lógico, isto é, tal que as proposições se deduzem umas das outras com tal exactidão, que nenhuma demonstração provoca a dúvida. É o sistema da geometria de Euclides. (...)*”.

Mas, logo a seguir, Einstein presta também **homenagem a Galileu por se ter batido valentemente para impor o conhecimento empírico**. E porquê? Einstein responde:

“Porque o pensamento lógico, por si mesmo, não pode oferecer nenhum conhecimento tirado do mundo da experiência. Ora, todo o conhecimento da realidade vem da experiência e a ela se refere. Por este facto, conhecimentos deduzidos por via puramente lógica, seriam diante da realidade estritamente vazios”.

Aqui abrimos um parêntesis para dizer o seguinte: A frase por nós destacada a corpo negro é tipicamente empirista e, por si só, podia ser subscrita por qualquer dos grandes pensadores empiristas ingleses do século XVIII.

Ora, se olharmos para a produção de Einstein, seguindo o seu conselho atrás referido, somos forçados a concluir que a sua obra pouco sustenta a visão empirista da ciência (85). Há aqui uma contradição. Einstein tinha razão no aviso que nos fez. Olhando ao que ele fez, vêmo-lo (**nós**) como um físico predominantemente racionalista. Olhando ao que ele diz (particularmente à frase destacada) nesta primeira parte do discurso vêmo-lo como empirista. Não será o estigma positivista, fenomenista e nominalista reinante na Filosofia da Ciência do século passado e da primeira metade do nosso século a deixar as suas marcas?

Mais à frente, Einstein assume uma visão mais consentânea com o seu trabalho. Ele escreve o seguinte:

*“Portanto, no sistema de uma física teórica, estabelecemos um **lugar para a razão e para a experiência**. A razão constitui a estrutura do sistema. Os resultados experimentais e suas imbricações mútuas podem ser expressos mediante as proposições dedutivas. E é na possibilidade desta representação que se situam exclusivamente o sentido e a lógica do sistema inteiro, e mais particularmente, dos conceitos e dos princípios que formam as suas bases. Aliás, **estes conceitos e princípios revelam-se como invenções espontâneas do espírito humano**. Não podem justificar-se a priori nem pela estrutura do espírito humano nem, reconhecamo-lo, por uma razão qualquer.*

Estes princípios fundamentais, estas leis fundamentais, quando não se pode mais reduzi-los a lógica estrita, mostram a parte inevitável, racionalmente incompreensível da teoria. Porque a finalidade precípua de toda a teoria está em obter estes elementos fundamentais irreduzíveis tão evidentes e tão raros quanto puderem ser, sem se olvidar da adequada representação de qualquer experiência possível.”

A segunda frase que destacámos a negro revela-se uma das constantes do pensamento de Einstein. Segundo ele, os grandes princípios em que assentam as teorias físicas e matemáticas são inventadas pelo espírito humano. Segundo Poincaré eram convenções úteis.

E, numa fase posterior do discurso, encaramos com um Einstein ainda muito mais racionalista quando escreve:

“O carácter fictício dos princípios torna-se evidente pela simples razão de que se podem estabelecer dois princípios radicalmente diferentes, que no entanto concordam em grande parte com a experiência. De qualquer modo, toda a tentativa de deduzir logicamente, a partir de experiências elementares, os conceitos e as leis fundamentais da Mecânica está votada ao malogro. (...) Estou convencido de que a construção exclusivamente matemática nos permite encontrar os conceitos e os princípios que os ligam entre si. Dão-nos a possibilidade de compreender os fenómenos naturais. Os conceitos matemáticos utilizáveis podem ser sugeridos pela experiência, porém em caso algum deduzidos.”

Temos de concordar com Einstein e concluir que quem não esteja em condições de analisar o trabalho de Einstein não pode conhecer verdadeiramente como ele trabalha. E mais, fica sem conhecer a sua posição epistemológica.

A **filosofia positivista e neopositivista**, que dominou o pensamento científico durante o século passado e uma grande parte do nosso, contribuiu para reforçar a ideia de um pretenso método científico que na Física é muitas vezes designado por «*método experimental*». Já sabemos que o pensamento positivo é fenomenista e nominalista. Só o conhecimento dos factos, do observável, do verificável é

importante. Então há que experimentar, experimentar muito, quanto mais melhor, a caminho da verdade científica. A verdade reside na experiência e tudo o que vai para além dela é pura especulação. É a crença na análise objectiva da experiência, isto é, que todos a analisam do mesmo modo, registam os mesmos dados e chegam exactamente às mesmas conclusões.

O pensamento positivista discute o método científico como quem discute uma receita para emagrecer. Discriminam-se as fases e analisam-se uma a uma. Treinam-se e aperfeiçoam-se. Ensinam-se as fases do «*método de descoberta*» da Ciência aos candidatos a cientistas e exige-se que eles as respeitem como um cozinheiro respeita uma receita de um bolo de que o cliente gostou muito. É a época do célebre OHERIC (observação, hipótese, experimentação, resultado, interpretação e conclusão) como método científico por excelência (Cervo e Bervian, 1977, pp. 20-35).

Esse *modismo* passou e hoje um livro didáctico de Física ou de outra ciência que preconize o uso do OHERIC está desactualizado 30 anos e votado ao insucesso. Mas se esse modismo positivista passou, outros infelizmente ainda sobrevivem, mas sobre isso dissertaremos noutro local.

3.10.14 Há dois níveis de pensamento que se revelaram fundamentais na história da Ciência

Vamos finalmente centrar-nos num dos problemas importantes que prometemos discutir: *o conhecimento científico opõe-se ao conhecimento vulgar ou é o prolongamento dele?*

A respeito deste problema as diversas epistemologias apresentam dois tipos de respostas:

- as *epistemologias descontinuístas* consideram que a edificação do conhecimento científico decorre através de «saltos» no modo de pensar acerca dos fenómenos científicos, através de crises, refutações ou rectificações, portanto por eliminação de erros; apesar de haver um substrato que se vai mantendo, há uma descontinuidade nos saberes, na linguagem científica, nas técnicas e nos métodos;
- as *epistemologias continuístas*, pelo contrário, vêem a construção do conhecimento como um processo que se desenvolve contínua e harmonicamente, de um modo perfeitamente homogéneo.

Vamos analisar o pensamento dos principais epistemólogos do nosso século a respeito do problema em discussão, mas vamos também aproveitar para analisar a sua posição face à metodologia da ciência física.

Um dos maiores pensadores racionalistas do nosso século foi **Bachelard**, e ele considerava a opinião baseada no senso comum como um obstáculo epistemológico à construção do conhecimento científico, uma autêntica barreira do pensamento ao pensamento.

Por outro lado, o **conhecimento vulgar** é vago, essencialmente prático e utilitário, dirige-se mais ao saber que ao compreender, enquanto que o **conhecimento científico** se dirige mais ao compreender e constrói-se na base da problematização das situações e na procura de resposta a esses problemas. É um conhecimento que se destina essencialmente a satisfazer uma curiosidade científica, embora indirectamente possa ter interesse prático. É um conhecimento que, embora exija experimentação, não é empírico, pois a experimentação é uma forma de submeter a um veredicto as ideias racionalmente estabelecidas e deve ser encarada assim como um modo muito especial e importante de teorizar. Bachelard quase não distingue teoria e experimentação, dado o facto de esta estar impregnada de teoria. Para ele, os próprios instrumentos científicos, desde os reactores nucleares até aos aceleradores de partículas, são “*teorias materializadas*”. Concluimos, pois, que Bachelard é um **epistemólogo descontinuísta** (86).

Karl **Popper** tem sido muitas vezes conotado com o pensamento empirista lógico, mas, na verdade, ele acabou por se afastar dessa linha e tem uma filosofia muito marcante e muito própria a respeito do conhecimento. A sua **posição** face ao *problema da ruptura ou não entre conhecimento vulgar e científico* é claramente **oposta à do racionalista crítico Bachelard**.

Para Popper, o conhecimento científico é um prolongamento do conhecimento comum. É, como ele dizia, “*o senso-comum esclarecido*”. Os epistemólogos que, como Popper, defendem uma continuidade entre pensamento comum e pensamento científico vêm no primeiro já alguns germes do segundo. Para eles, o pensamento comum assemelha-se ao que foi a Ciência numa fase primitiva: implica já alguns conhecimentos gerais, ainda que vagos. E não consideram haver rupturas na transição dessa fase científica primitiva para a seguinte.

Os enunciados básicos têm enorme importância porque é a partir deles que decidimos “*se uma teoria pode ser chamada de falseável, isto é, de empírica. Precisamos deles, ainda, para corroboração de hipóteses falseadoras e, assim, para o falseamento de teorias*” (Popper, 1993, p. 107). Voltaremos a este assunto da *falsificabilidade* mais tarde, a propósito da questão da demarcação da Ciência.

Porém, **a teoria é considerada muito importante para o valor dos enunciados experimentais**. Nunca devemos aceitar “*enunciados básicos dispersos*” (...) por “*mais rica que seja a colecção*” dos mesmos. “*A concordância quanto à aceitação ou rejeição de enunciados básicos é alcançada, geralmente, na ocasião de aplicar uma teoria (...) as conexões entre as nossas várias experiências são explicáveis e deduzíveis em termos de teoria que nos empenhamos de submeter à prova (...) O teórico propõe certas questões bem delimitadas ao experimentador e este, através da experimentação, tenta chegar a uma resposta decisiva para essas questões, e não para outras*”(Popper, 1993, p. 114).

Vemos, pois, patente em Popper, a **importância de uma ligação entre teoria e experimentação**. Esta, sem aquela, não funciona. Ou seja: apesar da resposta de Popper ao problema da relação entre conhecimento vulgar e conhecimento científico ser oposta à do racionalista Bachelard, a sua posição a propósito do método experimental afasta-se bastante da posição indutivista tradicional e não pode ser considerada empirista.

Um dos epistemólogos mais importantes no nosso século é Thomas **Kuhn**. A sua obra *«The Structure of Scientific Revolutions»* é um marco histórico no pensamento moderno acerca da Ciência, podendo-se mesmo falar em dois períodos na Epistemologia da Ciência: o anterior a Kuhn, onde dominou o empirismo lógico; e o posterior a Kuhn, onde se destaca o trabalho de alguns epistemólogos, já atrás referidos, que fortaleceram o paradigma construtivista actual. Esse grande historiador da Ciência (a sua obra *«The Copernican Revolution»*, de que há uma tradução portuguesa, testemunha-o), realçou a não existência de factos científicos independentes de um quadro teórico. Um dos alertas que o levou a ter esta ideia foi a dificuldade que os historiadores da Ciência estavam a ter em responder com toda a convicção e exactidão a questões do tipo *«quando aconteceu esta descoberta?»*, ou *«quem primeiro concebeu esta ideia?»* (87).

As primitivas fases de desenvolvimento de muitas ciências são caracterizadas por uma competição permanente entre pontos de vista acerca da Natureza, e este facto foi notado e realçado por Kuhn. Cada ponto de vista deriva em parte e é grosseiramente compatível com os trâmites da observação e do método científico.

“O que distingue estas várias escolas não foi uma ou outra falha do método - eles eram todos “científicos”, mas o que nós chamaremos os seus incomensuráveis processos de ver o mundo e praticar a ciência” (Kuhn, 1970, p. 4).

Baseado numa análise histórica, Kuhn encara o processo da Ciência como uma sucessão de fases, que ciclicamente se vão repetindo. Assim temos (Kuhn, 1970, pp. 10 a 22):

- Uma *fase pré-paradigmática*, durante a qual os fenómenos são investigados à luz de concepções distintas, conduzindo a modelos por vezes antagónicos. É a fase da confrontação das teorias, às vezes com bastantes polémicas.
- Segue-se a *emergência de um paradigma*, correspondente ao sucesso de determinadas concepções que se revelam eficientes na interpretação dos fenómenos conhecidos e nas previsões acerca de novos fenómenos.
- Vem então o *desenvolvimento da ciência normal*, em que o paradigma (o conjunto das concepções que se impuseram) é adoptado pela comunidade científica, ensinado e utilizado como chave para a explicação das observações e experiências que vão surgindo. Os problemas científicos vão sendo resolvidos, com maior ou menor dificuldade, no quadro teórico do paradigma. Vive-se numa fase de *tranquilidade teórica* e de grande importância no amadurecimento histórico da Ciência. (Kuhn, 1970, pp. 23 a 42).
- A certa altura, a *ciência normal entra em crise*. Há determinados problemas que teimam em não ser resolvidos no quadro do paradigma. A comunidade científica debate-se com determinados enigmas e um complexo sistema de erros. Todas as crises acabam por um dos seguintes três processos (Kuhn, 1970, p. 84):
 - a ciência normal acaba por resolvê-la, apesar do desespero daqueles que viam na crise o fim do paradigma;
 - o problema que originou a crise persiste, resistindo quer à ciência normal quer a abordagens alternativas; então os cientistas convencem-se que nesse estado actual do desenvolvimento científico, não há possibilidade de resolver o problema surgido, atribuem-lhe um nome e põem-no de lado até ao aparecimento de novas ferramentas do conhecimento;
 - emerge um novo candidato a paradigma.

- Ocorre então, neste último caso, um período de *revolução paradigmática* em que, ao fim de um intervalo de tempo mais ou menos longo, acaba por se impor um novo paradigma. Na impossibilidade, em muitos casos, de comparar paradigmas rivais por métodos lógicos, usam-se muitas vezes critérios psicológicos, sociais e institucionais para os impor. A revolução científica, como novo meio de encarar o mundo, é uma fonte fundamental de progresso.
- Estabelecido um novo paradigma, vai seguir-se um novo período de ciência normal, e assim sucessivamente.

A epistemologia de Thomas Kuhn adquiriu um relevo enorme por se alicerçar na história da evolução das ideias científicas, e por ter dessa história uma **visão descontinuísta**, em que o conhecimento não vai progredindo contínua e harmoniosamente, mas, pelo contrário, através de revoluções epistemológicas.

A partir, principalmente, dos trabalhos de **Piaget** no campo da Psicologia e da Epistemologia, e de **Bachelard** e **Kuhn** no campo da Epistemologia, **a visão epistemológica descontinuísta transformou-se em paradigma**. Quer o conhecimento científico construído pelo ser humano, quer o conhecimento científico como processo histórico, passaram a ser encarados como processos descontínuos, por fases, por rupturas.

O **erro**, na Ciência, adquiriu a partir de então uma importância enorme, pois deixou de ser considerado um «desastre conceptual», com aspectos exclusivamente negativos, para passar a ser considerado como um **possível foco de uma revolução epistemológica e fonte de progresso do conhecimento no indivíduo ou na história**. Era a história a revelar que de pequenas «*múvens negras*» acabam por resultar grandes teorias. Isto teve, conforme veremos, consequências não só na própria Epistemologia como na educação científica.

Já nos referimos a vários epistemólogos posteriores a Kuhn, concretamente a Lakatos, Laudan e Van Fraassen, a propósito da essência do conhecimento. Agora, e a propósito do método científico, vamos sintetizar as principais ideias de um outro epistemólogo, este muito polémico: Paul Feyerabend.

Paul Feyerabend é frontalmente **contra a pretensão de haver um método** de construir o conhecimento científico e entende que a Ciência deve estar ao abrigo de todas as ideologias e *“ensinada como uma maneira de ver entre muitas outras e não como a única via que leva à verdade e à realidade.”*

No seu livro *«Contra o método»* apresenta um índice analítico (1993, pp. 17 a 21) onde vão sobressaindo as suas conhecidas **teses anárquicas**, que ele defende naquela obra. Resumimos, em seguida, algumas dessas teses:

- *“A Ciência é um empreendimento essencialmente anárquico: o anarquismo teórico é mais humano e mais susceptível de encorajar o progresso do que as alternativas respeitadoras da lei e da ordem”.*
- *“O único princípio que não inibe o progresso é: qualquer coisa serve”.*
- *“Podemos fazer avançar o conhecimento científico procedendo de modo contra-indutivo” (usando hipóteses contrárias a teorias e resultados experimentais estabelecidos).*
- *“A condição de consistência que exige que as novas hipóteses concordem com as teorias aceites é irracional, uma vez que defende a teoria mais velha e não a melhor teoria.”*
- *“As hipóteses que contradizem teorias confirmadas e a proliferação de teorias são factores benéficos para a Ciência (dão-nos dados e suporte conceptual que sem esses factores não teríamos)”.*

- *“Não há ideia, por mais antiga e absurda, que não seja susceptível de melhorar o nosso conhecimento. A Ciência absorve o conjunto da história do pensamento e esta é utilizada para melhorar toda e qualquer teoria isolada”.*
- *“A ingerência política também não é de rejeitar. Pode tornar-se necessária para vencer o chauvinismo da Ciência que resiste às alternativas ao status quo”.*
- *“Uma teoria nunca concorda com todos os factos do seu domínio, mas isso não significa que a teoria deva ser condenada. Os factos são constituídos por ideologias anteriores, e a discrepância entre os factos e as teorias pode ser uma prova de progresso”.*
- *“Deve ser abolida a distinção entre um contexto de descoberta e um contexto de justificação, entre termos observacionais e termos teóricos. Nenhuma destas duas distinções desempenha qualquer papel na prática científica. As tentativas no sentido do seu reforço teriam consequências desastrosas. O racionalismo crítico de Popper fracassa pelas mesmas razões.”.*
- *“Nem o conhecimento científico nem a racionalidade são critérios universais de medida da excelência. São tradições particulares, inconscientes do seu enraizamento histórico.”*
- *“A Ciência é uma tradição entre muitas outras e uma fonte de verdade apenas para os que fizeram as escolhas culturais adequadas. Numa sociedade democrática deve ser separada do estado, tal como é hoje o caso da religião. Não há factos ou modelos que possam garantir-lhe uma excelência privilegiada”.*

E, para sustentar algumas destas teses, Feyerabend também recorre à história da Ciência. Analisa numa perspectiva muito pessoal o trabalho de Galileu, e emite a propósito do trabalho deste físico alguns juízos altamente polémicos e outros «*eventualmente chocantes*» (principalmente os que se referem à relação entre Galileu e a Igreja).

A terminar, um breve **resumo** de algumas ideias-chave recolhidas da história:

- **O pensamento processa-se com esquemas mentais**, simples e complexos.
- Há **dois níveis fundamentais de pensamento** que se revelaram importantes na história da Ciência: o **pensamento vulgar**, do dia a dia, do senso comum e o **pensamento científico**.
- **Não há qualquer caminho meramente lógico, nem puramente experimental para o estabelecimento das leis da Física.**
- **As teorias são muito mais do que conjuntos de leis** e são holísticas nos seus aspectos essenciais. Não estão relacionadas indutivamente com os dados dos sentidos. **São construções da mente humana.**
- A Física também vive de crises e grandes «saltos no escuro».
- A Matemática, só por si, não garante uma descrição da realidade. Mas é imprescindível.

3.11. O pensamento vulgar antecede o pensamento científico e constitui um obstáculo à construção deste - 5º Princípio

Vimos como historicamente se revelaram importantes dois níveis de pensamento: o **pensamento vulgar**, do dia a dia, do senso comum, da experiência inicial ou primeira, e o **pensamento científico**.

Também nos apercebemos da dificuldade histórica em impor a Ciência Moderna, fundamentalmente assente num pensamento científico do Universo, quando o conhecimento científico anterior se baseava, essencialmente, no pensamento vulgar, holístico e amarrado ao senso comum e a preconceitos.

Quando olhamos à nossa volta, vemo-nos «colados» a uma Terra plana e parada, com um Sol esplendoroso e umas insignificantes estrelas a rodarem em torno de nós. Sentimos o frio do Inverno, onde o Sol nos parece mais longínquo, afagando-nos muito menos com o seu «calor». Vemos as folhas a caírem mais lentamente que as pedras e observamos que os corpos páram quando deixam de ser empurrados. Do ponto de vista do conhecimento científico, somos vítimas de uma «ilusão», fruto de um conhecimento sensorial, espontâneo e assistemático. Acabamos mais tarde por saber que afinal a Terra é esférica e move-se, que somos nós que rodamos em torno do Sol, que é apenas uma estrela média quando comparada com as maiores, que no Inverno estamos mais perto do Sol do que no Verão, que as folhas e as pedras caíam ao mesmo tempo se não fosse a acção do ar, e que os corpos não actuados por forças movem-se eternamente com velocidade constante. Mas isto é o resultado de uma enorme elaboração do nosso pensamento, elaboração essa que se baseia na «purificação» dos dados sensoriais pela razão.

O conhecimento científico que adquirimos está muito para além do conhecimento vulgar de que dispomos, resulta de um pensamento altamente elaborado, sendo o fruto de muita reflexão pessoal e muito esforço de compreensão das ideias que a Ciência nos propõe. Essa reflexão e esse esforço encontram um paralelismo na história da própria Ciência.

Torna-se claro que, quando se considera Galileu um ponto crítico, de ruptura epistemológica e mudança de paradigma, não se pretende dizer que até aí todo o conhecimento científico foi medíocre e a partir daí a Ciência adquiriu o estatuto de excelência. Já antes de Galileu havia excelente pensamento científico (basta lembrarmo-nos, por exemplo, de Arquimedes) e, aliás, sem algumas boas ideias científicas e metacientíficas como suporte, capazes de provocar grandes contradições internas no sistema científico, não teria havido uma tal revolução no pensamento acerca do mundo. O que pretendemos é ilustrar de uma forma global, «macroscópica», o que se passa a um nível «microscópico», que é o nível de pensamento pontualmente histórico e até mesmo o nível pessoal de conhecimento.

Mesmo a nível pessoal, cada ser humano começa sempre por ter um pensamento bastante empirista, concreto, altamente sensorial, assistemático, e só depois atinge a fase do pensamento mais racional, formal e abstracto.

Historicamente sempre se verificaram passagens de um nível de pensamento ao outro. Quando o homem, ao ver os mastros dos navios aparecerem primeiro no horizonte, atingiu, racional e empiricamente (raciocinou e dispôs do referido dado), a conclusão, já elaborada para a época, de que a Terra é redonda, já estava em pleno *fluxo espontaneidade primitiva-Ciência*.

Também os nossos alunos ultrapassam autênticos obstáculos epistemológicos, mas logo outros se lhes deparam no caminho. As dificuldades de aprendizagem da Ciência, a tendência para a persistência do raciocínio aristotélico nos alunos e em pessoas cultas, tudo isso são manifestações da existência de obstáculos epistemológicos.

3.12. Há um isomorfismo entre a construção do conhecimento físico por cada indivíduo e a construção do conhecimento físico ao longo da história - 6º Princípio.

A análise que fizemos a propósito do problema da essência do conhecimento físico conduziu-nos à ideia fundamental de que este conhecimento, quer encarado numa perspectiva social quer numa perspectiva individual, é uma construção humana em transformação permanente. Enunciámos, então, várias teses construtivistas uma das quais é precisamente o título desta secção. Ao longo do desenvolvimento histórico que efectuámos a propósito do problema da metodologia do conhecimento e da relação entre as suas diversas formas fomos coleccionando mais argumentos a favor da mesma ideia.

Trata-se de uma tese que já há alguns anos perfilhamos, desde que aprofundámos os nossos conhecimentos da história da evolução das ideias em Física e da epistemologia desta ciência, e desde que travámos contacto mais íntimo com a Psicologia e Epistemologia genética e, simultaneamente, com os diversos trabalhos no domínio das concepções alternativas.

Começámos, então, a tomar consciência de que muitas das deficiências conceptuais manifestadas pelos alunos de Física são as mesmas que os cientistas foram revelando ao longo da história da Física (conforme ilustraremos com diversos exemplos no próximo capítulo). E notámos, também, de que havia dificuldades similares na evolução do pensamento individual e na evolução do pensamento histórico.

A este respeito, publicámos alguns trabalhos já no âmbito deste nosso projecto de doutoramento, os quais foram anexados a este relatório.

Tivemos oportunidade de verificar, entretanto, que Piaget, nos últimos anos de vida, se bateu mais do que nunca pela tese que serve de título a esta secção, principalmente a partir de 1967, quando se associou ao físico e epistemólogo Rolando Garcia, que foi discípulo de Carnap e Reichenbach. Do trabalho deles

resultou uma obra intitulada «*Psicogénese e História das Ciências*», cuja versão final ficou completa em 1980, e de que há uma tradução portuguesa publicada em 1987.

O grande objectivo deste último trabalho de Piaget é mostrar que “*os mecanismos de passagem de um período histórico ao seguinte, no contexto de um sistema de noções, são análogos aos da passagem de um estágio genético aos seus sucessores*” (Barbel Inhelder, no Prefácio à referida obra, p. 13).

A *Epistemologia histórico-crítica*, que tem como objectivo a análise da construção do conhecimento ao longo da história, e a *Psicologia genética*, que estuda a construção do conhecimento no ser humano até ao seu pleno desenvolvimento, revelam um isomorfismo entre essas duas construções.

Independentemente de surgirem noções idênticas no percurso do aprendiz de ciência e na história da Ciência, Piaget e Garcia colocam esse isomorfismo em termos de mecanismos do conhecimento, particularmente *mecanismos de abstracção empírica e reflexiva*, e em termos de *problemas gerais comuns* a todo o desenvolvimento epistemológico (problemas como o do papel da experiência nas construções operatórias do sujeito, a natureza das relações entre sujeito e objecto, etc.).

A este propósito, Piaget e Garcia escrevem o seguinte (1987, pp. 37 e 38):

“*Num caso particular, constituído pela evolução do conhecimento físico entre a física de Aristóteles (inclusive) e a física dos últimos períodos pré-newtonianos, foi-nos possível estabelecer correspondência, e mesmo estreita, entre as quatro fases históricas (os dois motores aristotélicos, o recurso a um único motor externo, a descoberta do ímpetus e depois a descoberta da aceleração) e as quatro etapas da psicogénese. Cerca dos sete, oito anos de idade observa-se, em especial, uma construção e uma generalização admiráveis da ideia de élan numa analogia surpreendente com as concepções de Buridan. Num tal caso, o paralelismo entre a evolução das noções no decorrer da história e no seio do desenvolvimento*

psicogenético refere-se ao próprio conteúdo das noções sucessivas e isso é compreensível, uma vez que se trata de conceitos de algum modo pré-científicos. Mas é óbvio que seria absurdo procurar generalizar um tal paralelismo de conteúdos no caso das teorias propriamente científicas, como as que surgiram entre a mecânica newtoniana e a relatividade einsteiniana, de tal modo que o essencial da nossa investigação se dirigirá não para o conteúdo das noções mas para os instrumentos e mecanismos das suas construções.”

Quer dizer: não se trata de afirmar que o percurso da criança é o mesmo da Ciência no que toca a conteúdos. **A homogeneidade verifica-se, sim, no que respeita ao modo como o conhecimento científico é construído pelo ser humano e pela história.**

Assim, por exemplo, houve, a nível do conhecimento histórico, barreiras difíceis de transpor no caminho para o pensamento científico. Essas mesmas barreiras surgem no ser humano. Bachelard estudou e referenciou algumas dessas barreiras. O conhecimento vulgar e primeiro, as ideias prévias, são um obstáculo ao conhecimento científico. Pois tanto o são na criança como na história. Bachelard fala, de modo muito claro, em “*obstáculos epistemológicos*”, com o significado que transparece na afirmação seguinte:

“Quando se procuram as condições psicológicas dos progressos da Ciência, em breve se chega à convicção de que é em termos de obstáculos que se deve pôr o problema do conhecimento científico. E não se trata de considerar obstáculos externos, como a complexidade e a fugacidade dos fenómenos, nem tão pouco de incriminar a fraqueza dos sentidos, e do espírito humano: é no próprio acto de conhecer, intimamente, que aparecem, por uma espécie de necessidade funcional, lentidões e perturbações. É aqui que residem causas de estagnação e mesmo de regressão, é aqui que iremos descobrir causas de inércia a que chamaremos obstáculos epistemológicos.” (Bachelard, 1981, p. 165).

Para Bachelard, o **obstáculo epistemológico** é, portanto, uma barreira que ocorre ao nível do próprio acto de conhecer (88). E é mais subjectivo que objectivo, quer

dizer, reside fundamentalmente no sujeito cognoscente e não no objecto do conhecimento. É, como gostava de dizer Bachelard, uma **barreira do pensamento a ele próprio**, uma **causa de estagnação no próprio pensamento**.

Esses obstáculos epistemológicos tanto surgem no processo de desenvolvimento do conhecimento de cada ser humano como na construção do conhecimento ao longo da história. Eles estão, cremos, **alicerçados no mais profundo da estrutura psíquica do ser humano** e repercutem-se na sua obra. Trata-se de uma rede de sedução intuitivas, de esperanças ingênuas na fácil explicação do mundo e hábitos de pensar que conduzem à falsa analogia, à explicação ilusória, ao preconceito.

Esses obstáculos epistemológicos, essa rede de preconceitos e maus hábitos de pensamento têm-se mostrado altamente persistentes, quer na história quer no percurso científico de cada ser humano. Resistem ao conhecimento científico e afectam-no. A causa dessa resistência reside num “*instinto conservativo*”, uma inércia intelectual que o ser humano e as sociedades humanas possuem que muitas vezes acaba por levar a melhor sobre o “*instinto formativo*”.

O conhecimento científico, como construção individual e social, passa a ser encarado como uma luta de instintos: de um *instinto inovador* contra um *instinto conservador*.

O **primeiro**, e porventura mais importante, **obstáculo epistemológico** que Bachelard refere é a “**experiência inicial**” ou “**experiência primeira**”. É o conhecimento baseado numa *espontaneidade primitiva*, na experiência inicial, no senso comum, a opor-se ao conhecimento científico. É, socraticamente, a *doxa* a opor-se à *epistème* (89).

É a percepção dos sentidos, aliada a uma intuição sensível (que já Kant desvalorizava) e a uma ordenação e interpretação acrítica dos dados sensoriais, que está no cerne do conhecimento do senso comum. Este caracteriza a nossa filosofia natural e primeira, que vai no sentido de aceitarmos como válido o que os sentidos nos dizem “*antes e acima da crítica*”. É a filosofia das crianças e dos adultos que, sem terem desenvolvido suficientemente o espírito científico, não se habituaram à dúvida pertinente, à crítica, à reflexão profunda, à verificação, à confrontação de ideias, à metacognição.

Este conhecimento vulgar vai dificultar, sobremaneira, o acesso ao conhecimento científico, não intuitivo nem imediato, crítico, discursivo. Não queremos com isto dizer que este conhecimento discursivo assente apenas numa componente racional e o outro numa componente empírica. Não é o caso. **As componentes racional, empírica, emocional e volitiva são indissociáveis no conhecimento**, até mesmo porque o ser cognoscente é um todo indissociável. Só que o conhecimento discursivo privilegia umas dessas componentes em desfavor de outras.

Usámos atrás a designação *espontaneidade primitiva* para a distinguir de uma outra espontaneidade que surge em plena elaboração do pensamento científico. É a **intuição científica**, o tal «faro» do génio, a tal luz que espontaneamente surge e ilumina o caminho até aí escuro. É o «*eureka*» que conduz ao caminho certo numa encruzilhada. Esta intuição, que vários pensadores destacaram de uma forma ou de outra, também tem sido importante na história do pensamento e determinadas epistemologias falharam ao não tê-la na devida conta.

Outro exemplo bachelardiano de **obstáculo epistemológico** é o **pensamento holístico, unitário**, a tendência para analisar os fenómenos em toda a sua globalidade e complexidade. Foi necessário abstrair de determinadas qualidades não matematizáveis para criar a Ciência Moderna. Evidentemente que isso teve os seus custos em termos epistemológicos, mas foi decisivo para a evolução do conhecimento do mundo. **Outro** exemplo ainda: o **obstáculo «realista»** ou **substancialista** (Bachelard, 1981, pp. 173 a 176) que parte de convicções substancialistas ingénuas, colocando-lhe propriedades diversas, inclusivé qualidades ocultas.

Analisando, então, o trabalho filosófico de Bachelard, concluímos que esse trabalho apresenta argumentos vários que favorecem a tese construtivista piagetiana que também defendemos, a de que há **um paralelismo entre a construção do conhecimento científico por cada ser humano e pela história**. E que dizer de outros trabalhos de outros campos e de outras origens?

Joseph Novak, discípulo do psicólogo americano Ausubel, chama a atenção (1992, p. 3.25) para um aspecto em que a *teoria epistemológica de Kuhn* e a *teoria psicológica de Ausubel* são de certo modo paralelas: **o papel dos conceitos na estrutura cognitiva do ser humano** (segundo Ausubel) **é algo análogo ao papel dos paradigmas no desenvolvimento histórico da Ciência** (segundo Kuhn). Com efeito, os cientistas apoiam-se nos paradigmas para procurarem nova informação para a sua actividade de resolução de «puzzles» e para descobrir novos significados em dados já existentes. Paralelamente, os seres humanos recorrem geralmente aos conceitos que possuem numa dada área para apreenderem significativamente a nova informação que vão obtendo, e para aumentarem a sua capacidade de resolver os problemas que lhes vão surgindo nessa área.

Este paralelismo foi explorado por **Barbara Bowen**, que trabalhou com Novak nos anos 70, e que também vislumbrou um aspecto em que a *Filosofia da Ciência*, na perspectiva de Kuhn, e a *Psicologia cognitiva*, segundo Vygotsky, são paralelas: **o papel da linguagem na aprendizagem dos conceitos** (segundo Vygotsky) **é análogo ao papel dos paradigmas no avanço da ciência** (segundo Kuhn). (Bowen, 1972).

Estes trabalhos integram-se todos numa área do conhecimento chamada *Epistemologia genética*. A Epistemologia genética, como a sua própria designação deixa transparecer, diz respeito à génese do conhecimento. Trata-se de uma área interdisciplinar onde se reúnem os trabalhos psicológicos sobre o desenvolvimento do conhecimento no ser humano e os trabalhos de epistemologia das ciências particulares que analisam a construção histórica da Ciência (Piaget, 1976, p. 160). Essa área do conhecimento só continuará a ter sentido se **a moderna psicologia da construção idiossincrásica dos novos significados acerca do mundo e a moderna epistemologia da construção do conhecimento apresentarem alguns aspectos paralelos**, o que se nos afigura, para já, como um facto.

Com base em tudo o que expusemos até ao momento e, ainda, nos trabalhos que entretanto produzimos e publicámos, os quais acrescentamos em apêndice a esta dissertação, julgamos, até prova em contrário, haver fundamentação para a tese explicitamente enunciada no título desta secção. Seguem-se outras teses, também apoiadas nos mesmos considerandos.

***3.13. Não há um método científico mas, sim, uma atitude científica. Hipóteses, modelos e experimentação interagem não linearmente -
- 7º Princípio***

Ouvimos muitas vezes afirmar que a Ciência se distingue dos outros ramos do conhecimento por utilizar o «método científico». E que a chamada Ciência Moderna só se tornou possível porque Galileu descobriu o «método científico». Mas o que é isso do «método científico»?

O «*Dicionário da Sociedade da Língua Portuguesa*» refere-se à palavra «método» com o significado (entre outros) de «marcha racional da inteligência para chegar ao conhecimento de uma verdade». Baseando-nos neste significado, poderemos talvez definir o método científico como *o caminho ou o processo racional da inteligência para chegar ao conhecimento de uma verdade científica*. Mas, o que é a verdade científica? E onde está esse caminho?

Se as leis ditam a verdade, a verdade científica, no caso da Física, está nas leis da Física. Ora, não há nenhum caminho lógico para a descoberta das leis da Física, como aliás Einstein várias vezes afirmou. Mesmo que houvesse um caminho unívoco para o estabelecimento das leis (e não há), depararíamos com outra dificuldade: é que, como já frizámos, **as teorias físicas são muito mais do que conjuntos de leis.**

As teorias físicas só têm valor quando analisadas na sua globalidade, o que envolve, para além da fundamentação dos princípios em que assentam, a coerência lógica que apresentam, as previsões que efectuam e o veredicto da experiência acerca destas previsões. Portanto, na construção das teorias físicas - elas são o coração da Física! - há todo um processo dialéctico entre experiência e teoria, entre concepções e metodologia, tão complexo e sinuoso que torna inviável falar-se num método científico.

A *influência* que Francis Bacon (1561-1626) e a sua obra «*Novum Organon*» tiveram no desenvolvimento da Ciência Moderna foi, durante muito tempo, *sobrestimada*. O método baconiano, apesar de ter marcado toda a Filosofia da Ciência até hoje, pouco teve a ver com os trabalhos dos cientistas que fundaram a Ciência Moderna, pois não teve em linha de conta diversos aspectos que foram preponderantes nesses trabalhos. Entre estes aspectos decisivos, salientamos: o contributo da imaginação e da intuição científica na elaboração das hipóteses; o papel da dedução na construção de consequências testáveis através de observações experimentais; e, particularmente, o papel da Matemática como **ferramenta indispensável** para o conhecimento do mundo físico.

Ignorando, portanto, os trabalhos científicos da sua época - os de Galileu, Kepler e Brahe, a concepção metodológica de Bacon era extremamente limitativa, não dando conta do estatuto epistemológico das hipóteses e como elas funcionam, nem da forma como indução e a dedução, a experimentação e a teoria se harmonizam para originar a Ciência. E pressupunha que todas as mentes, aplicando as mesmas regras metodológicas e as suas «tábuas de indução», poderiam ficar ao mesmo nível e igualmente capazes de construir o conhecimento científico, o que é manifestamente falso.

Apesar de tudo o que dissemos, a marca ou ferrete do método indutivo baconiano, mais tarde desenvolvido por outros filósofos como Stuart Mill, haveria de perdurar até aos nossos dias. Ainda hoje há uma tendência para um empirismo indutivista de inspiração baconiana que, só por si, não conduz a nada.

Vimos também como o racionalista Descartes defendia um método analítico-sintético, de inspiração matemática, em que, por um processo de *análise*, somos conduzidos aos elementos simples e evidentes, a que se segue um processo de síntese, em que se atinge o complexo por reunião das evidências simples. Para esse processo, Descartes considera importante duas operações racionais da mente:

- a **intuição**, uma forma de aceder ao conhecimento em bloco, de modo imediato, sem qualquer raciocínio ou inferência; é uma espécie de «luz natural» que usamos para conhecer os objectos ou elementos simples;
- a **dedução**, ou meio através do qual a inteligência liga, interconexiona, os elementos simples, as ideias simples previamente apreendidas por intuição até abarcar os fenómenos complexos.

Claro que a boa *intuição* se revelou muito importante para o estabelecimento das ciências físicas e a dedução não menos. Mas o método cartesiano, sendo um farol de onde se retiram ideias excelentes, está muito longe de corresponder a qualquer hipotético modelo estereotipado de construção da Física. E porquê? Essencialmente por ser demasiado racionalista, tão racionalista que até necessitava de uma Consciência (Deus) para garante da validade. E tão racionalista que conduziu a uma teoria do mundo incrivelmente complexa como é a dos turbilhões. Devemos duvidar dos sentidos, que são enganadores, como dizia Descartes. Porém, mesmo traiçoeiros, temos de recorrer criticamente aos dados que eles nos fornecem, por serem imprescindíveis para construir o conhecimento científico.

Vamos criar um *modelo* de método científico vincadamente *empirista* para analisar um fenómeno A, para seguidamente o criticarmos:

1º - *Observação*: aplicar atentamente os sentidos, fazer as medições com todo o cuidado para recolher dados científicos o mais exactamente possível.

2º - *Hipótese*: fazer uma suposição acerca da lei que explica o fenómeno.

3º - *Experimentação*: recriar o fenómeno no laboratório, usando os aparelhos experimentais e as regras de Bacon, preenchendo uma «tábua de presenças», outra «de ausências» e «outra de graus» (ver nota 75) ou, querendo ser mais actual, a metodologia de Stuart Mill, um refinamento da de Bacon (Cervo e Bervian, 1977, pp. 22 a 25), ou, querendo ser ainda mais moderno, recorrendo às actuais tabelas de dupla ou tripla entrada.

4º - *Indução*: generalizar as regularidades encontradas com as tabelas de Bacon ou Stuart Mill para todos os fenómenos análogos ao fenómeno em causa.

5º - Etc., etc.

Temos como resultado uma lei empírica. Foi assim que Ohm estabeleceu a sua célebre lei que relaciona a diferença de potencial nos extremos de um condutor óhmico com a intensidade da corrente? Não, não foi. Ohm **deduziu** a lei que nós hoje verificamos experimentalmente.

Há leis que foram estabelecidas por um processo parecido a este? Há. Mas, em que estão subentendidos muitos passos escondidos que alteram por completo a maneira de encarar filosoficamente o processo. Senão vejamos:

No ponto 1 há que aplicar atentamente os sentidos. Aplicar atentamente os sentidos em quê? Para observar o quê? Ao acaso? Estamos à espera que a Natureza se encarregue de nos dar de bandeja os dados de que nós necessitamos? Nem pensar. Precisamos de ter por detrás uma reflexão profunda para sabermos o que vamos observar e como vamos observar. Portanto, devíamos colocar um passo 0 chamado reflexão, ou uso da razão.

Há, em quem defende um método destes, um preconceito nítido: o de que a Natureza nos fornece dados neutros e gratuitamente, o de que a percepção é o ponto de partida. Não é verdade. Os dados estão influenciados pelas ideias de quem observa e experimenta e têm que ser procurados a partir de muita reflexão.

Passemos ao ponto três. Vamos usar os aparelhos experimentais e recolher dados para preencher as tabelas. Mas, como usar os aparelhos experimentais sem ter por trás um conhecimento teórico acerca do seu funcionamento, da teoria dos erros cometidos, etc. Aí está a teoria a mascarar o método e a intrometer-se nele.

Em suma:

Este método empírico é um falso método, porque esconde toda a componente racional que está por trás de cada um dos seus passos. Além do mais - e isto é importante - a lei estabelecida não constitui, só por si, qualquer teoria. Podemos ter uma lei empírica ou mesmo um conjunto de leis empíricas bem estabelecidas acerca de um fenómeno e faltar-nos o principal: uma teoria minimamente credível acerca do mesmo fenómeno.

Vamos agora pensar num *modelo* de método científico vincadamente *racionalista*, para também o criticar depois:

1º- *Axiomas*: formulam-se um, dois ou três princípios com carácter axiomático, o mínimo necessário para se construir a teoria do fenómeno.

2º- *Dedução*: por meio do raciocínio hipotético-dedutivo, com todo o rigor lógico proporcionado pela Matemática, desenvolvemos uma teoria baseada nos axiomas.

3º- *Leis secundárias*: com base na teoria deduzimos racionalmente leis válidas para o fenómeno.

4º - Etc., etc.

Crítica:

No ponto um são formulados princípios básicos. Mas porquê esses e não outros? Com princípios diferentes, podemos chegar a conclusões semelhantes acerca dos mesmos fenómenos. Veja-se os princípios da física newtoniana, completamente diferentes dos da física einsteiniana e chegando a previsões semelhantes para os fenómenos de movimento a baixas velocidades.

O que nos garante que esses princípios são os correctos e não outros? Não temos qualquer garantia, nem o indício de quais são os correctos. Esse indício é fornecido pela experiência. Portanto, está escondido um ponto 0, que é: experiências que indiciam os princípios adoptados.

Quando, por exemplo, Einstein estabeleceu a Teoria da Relatividade, partiu, de facto de dois axiomas: o da invariância da velocidade da luz no vácuo, e o princípio da relatividade das leis da Física.

Mas, na base desses axiomas, está todo um acumular de dados experimentais que conduziram ao bloqueio epistemológico em que caiu a Física newtoniana: de Bradley, sobre a aberração das estrelas, de Arago sobre a aberração da luz através dos prismas, de Fizeau sobre a interferência nos tubos de água, de Michelson-Morley sobre a interferometria da luz, etc.

Além disso, ainda que os axiomas fossem estabelecidos por intuição pura, a teoria estabelecida dedutivamente no ponto 2 do pseudo-método, e as leis deduzidas a partir dessa teoria não teriam qualquer valor se não fossem submetidas ao veredicto da experiência.

Em suma : *o nosso modelo racionalista também falha.*

Em boa verdade **não há qualquer modelo de método científico que resista à crítica**, a começar por esta: serve em todos os casos? E **não há** por outros diversos motivos que teremos de resumir necessariamente:

- o conhecimento científico não provém apenas da experiência nem apenas da razão, não parte só dos factos para a teoria nem só da teoria para os factos;
- a procura das leis é simultaneamente racional e empírica;
- surge por vezes a necessidade de dar passos aparentemente ilógicos, grandes saltos no escuro;
- os factos não são neutros (estão ideologicamente contaminados) nem ditam univocamente uma teoria;
- as observações não são objectivas;
- a imaginação criadora é fundamental no estabelecimento de hipóteses;
- a boa experimentação está carregada de teoria e crítica teórica e tanto serve para ajudar a estabelecer leis e princípios *a posteriori* como para verificar *leis apriori*;
- a construção do conhecimento científico assenta numa permanente resolução de problemas intrincados e imbricados, em que, por cada problema que se resolve, surgem vários para resolver.

Finalmente, a ausência de um método padrão para construir o conhecimento científico deve-se à indissociabilidade entre experimentação e raciocínio. Parafraseando Bachelard (1986, p. 11), afirmamos que um cientista “*se experimentar terá de raciocinar. Se raciocinar, terá de experimentar*”. Nem é teórico puro nem experimentalista puro.

Se não há um método para caracterizar o trabalho do bom cientista e para o conduzir no caminho certo, o que é que há? Há um **espírito científico**, uma **consciência científica** ou uma **mentalidade científica**, como queiramos.

Esse espírito científico, a que já nos referimos a propósito do trabalho de Kepler e de Galileu, é uma disposição subjectiva que conduz a uma **atitude científica**. Esta atitude científica manifesta-se, acima de tudo, na procura constante e esforçada de soluções sérias, contra todos os preconceitos. O sujeito portador de um bom espírito científico tem, entre outras, as seguintes características:

- um grande poder crítico, que se traduz pela capacidade de avaliar o material científico próprio e alheio, distinguindo as ideias e analisando em profundidade o conteúdo;
- um grande poder de objectividade, ou seja a capacidade de tornar o trabalho o mais impessoal possível (a objectividade total é utópica), rompendo com todas as posições subjectivas mal fundamentadas;
- um bom poder de clareza, isto é, a capacidade de tornar o trabalho transparente a quem esteja em condições de o criticar;
- grande sagacidade, discernimento e raciocínio claro e preciso;
- enorme curiosidade intelectual e boa capacidade de observação;
- imaginação ousada, mas regida pela necessidade de prova;
- intuição para descobrir o caminho certo nos labirintos da Ciência;
- modéstia, com consciência das limitações próprias e dos erros cometidos;
- imparcialidade perante os factos e as doutrinas, com respeito pela verdade;
- boa capacidade de explorar os próprios erros e os erros dos outros, como geradores do conhecimento;

- grande capacidade de trabalho, de sofrimento, e de abdicação de muitos valores mundanos não culturais.

O espírito científico não é inato. Pode adquirir-se ao longo da vida com esforço, treino e o exemplo.

Quando um novo membro ingressa na “*cidade científica*” (para usar um termo bachelardiano), toma consciência do espírito científico. Este é um espírito que paira no grupo, assemelha-se de certo modo a um espírito de corporação, de que cada membro iniciado se vai apercebendo e imbuindo.

Em suma e para concluir:

A Física constrói-se com base numa metodologia complexa e variável em que está envolvida uma **dialéctica entre teoria e experimentação**. Na Física as hipóteses, os modelos e a experimentação estão entrelaçados num **processo interactivo, dialéctico, não linear**, muito dependente de cada investigação. Não há qualquer processo único, taxativo, seja ele método experimental ou racional a que possamos chamar método científico. Há, isso sim, um **espírito científico** que desencadeia uma **atitude favorável à construção do conhecimento científico**.

No processo de construção do conhecimento científico **intervêm valores filosóficos, teorias, leis e conceitos aceites na base desses valores, questões fulcrais, acontecimentos e objectos do mundo em que vivemos, factos e conclusões e juízos de valor acerca destes**.

Os valores interferem nas filosofias, e estas, por sua vez, comandam a interpretação dos juízos formulados acerca dos factos observados.

O quadro conceptual (teorias, leis, conceitos) aceite interfere no modo como metodologicamente abordamos os acontecimentos-objectos para obter factos e conclusões acerca dos problemas que formulamos, e as conclusões levam-nos a

juízos cognitivos que nos conduzem a novos juízos de valor ou a reforçar os que já possuímos.

As conclusões que obtemos ora são completamente integradas no quadro conceptual aceite ora extravasam esse mesmo quadro teórico, obrigando à sua reformulação. O corpo teórico, assim alterado, conduz, por sua vez, ao levantamento de novas questões, novos problemas.

Os dados adquirem significado com base nos conceitos mas, por sua vez, os conceitos são muitas vezes revistos com base em novos dados.

De todos os modelos que conhecemos, o que mais se aproxima da visão dialéctica da Ciência, que nesta unidade procurámos fundamentar, é o «Vê» de Gowin. Esse «vê» epistemológico é o que julgamos que melhor alumia o transeunte tacteante no caminho conducente ao aprimoramento dos conceitos e das leis científicas. E foi esse o motivo por que o adoptámos nesta investigação.

3.14. Na comunidade dos físicos e dos professores de Física assentaram ideias demasiado realistas e empiristas

A nossa experiência da Sociedade Portuguesa de Física permitiu-nos imensos contactos com professores de Física, particularmente através de acções de formação. Através desses contactos, fomos nos apercebendo de que afirmações correntes tais como «*a Física é uma ciência experimental*», «*a Física é uma ciência exacta*», «*a Física é o estudo da realidade do mundo físico*», em si correctas, são muitas vezes interpretadas com significados incorrectos, de um modo demasiado realista e empirista.

A primeira das frases anteriores vem geralmente conotada com a ideia de que a fonte prioritária do conhecimento físico é a experiência, a de que o conhecimento provém exclusivamente das sensações dos objectos.

A segunda frase tem por vezes o significado incorrecto de que a Física, com a objectividade que a experimentação lhe proporciona, garante o verdadeiro e total conhecimento dos fenómenos.

A terceira frase, por sua vez, esconde muitas vezes concepções incorrectas do que é a realidade que a Física investiga.

Designações como a de «*peso absoluto*» e frases como a de que «*a aceleração é absoluta*» não ajudam nada à tomada de uma posição epistemológica correcta. Essas ideias empiristas e absolutistas vêm associadas à da existência de um «método científico», que em Física assume a forma de um «método experimental», e que funciona como uma receita que é preciso utilizar para «descobrir as leis físicas». Esta ideia incorrecta, que pairou e ainda paira em muitos físicos, conduziu a que muitos cursos de Física insistissem por demais na chamada «aprendizagem por descoberta», em que os alunos, seguindo um determinado protocolo, vão «descobrir por eles as leis da Física». Era uma pedagogia assente numa base empírico-indutivista, que ainda tem reflexos negativos no modo de encarar a importante actividade experimental em Física.

Ora a história da Física não estimula nada quem, reflectindo sobre ela, pretenda fundamentar uma posição empirista e realista. Com isto também não estamos obviamente a defender as posições opostas, nem a diminuir o valor (importante, insistimos) da experimentação. Entendamo-nos. Podemos ser fervorosos adeptos da experimentação sem ser empiristas, desde que saibamos atribuir a essa experimentação o papel que lhe cabe na construção do conhecimento.

Bassalo (1987) analisou, numa perspectiva filosófica, o desenvolvimento histórico de duas teorias científicas (a da estrutura da matéria e a da evolução do Universo). Apesar de alguns aspectos do artigo se revelarem menos claros e não subscrevermos tudo o que nele consta, o artigo de Bassalo revela-nos exemplos que mostram como não podemos atribuir qualquer prioridade ao realismo ou ao idealismo.

A Física Moderna revela, à evidência, que *objecto do conhecimento* e *sujeito cognoscente* são inseparáveis. Mas a própria Física Clássica, ao contrário do que afirma Bassalo (p. 82), também não estabelece qualquer separação absoluta entre sujeito e objecto. Senão vejamos:

A Mecânica de Newton de forma alguma prescindiu de hipóteses altamente subjectivas, tal como vimos a propósito de Newton.

Por outro lado, havia as chamadas qualidades secundárias dos corpos, dependentes do sujeito, e há um relativismo que está subjacente a vários conceitos, como o de velocidade e força.

Na Teoria da Relatividade Restrita é flagrante a influência do referencial do sujeito na interpretação da realidade objectiva. Pois se as características espaço-temporais variam de referencial para referencial, como não há-de variar também a interpretação dos fenómenos?

Não admira, então, que o próprio criador da Teoria da Relatividade Restrita, embora acreditando numa realidade ontológica subjacente aos fenómenos da Natureza, estivesse perfeitamente consciente da existência de um subjectivismo epistemológico, escrevendo frases, por exemplo, como esta:

“Diante da ilusão, bastante aristocrática, do poder de percepção ilimitada do pensamento, existe outra ilusão bem plebeia, o realismo ingénuo, segundo o qual os objectos “são” a pura verdade dos nossos sentidos. Ilusão que ocupa a actividade diária dos homens e dos animais” (Einstein, 1981, p. 45).

Outro aspecto em que não estamos de acordo com Bassalo é o seu apoio à ideia de que Einstein era materialista, porque sustentava que *“são as substâncias que determinam relações”*, enquanto Bohr era idealista porque defendia que *“as substâncias são definidas por relações através de uma medida”* (Bassalo, 1987, p. 82).

Pensamos que esta dicotomia materialismo-idealismo é uma visão insustentável (embora os filósofos materialistas dialécticos como Politzer a usem para defender as suas ideias).

Tal como afirma **António Sérgio**, no prefácio à edição portuguesa do livro de Bertrand Russell, «*Os Problemas da Filosofia*» (Russell, 1980, pp.15 a 16), há uma grande tendência para identificar o idealismo com o imaterialismo de Berkeley (é o que faz, por exemplo, Politzer) e “*dar a refutação da metafísica de Berkeley como se fora uma refutação do «idealismo» em geral*”. O idealismo posterior a Kant não nega que a matéria exista; a sua ideia fundamental é a da “*insuperável correlatividade do sujeito e do objecto, considerados como pólos de uma realidade única, com a tese de que tudo o que é conhecente - assim como tudo o que é conhecido -, a de que toda sorte de inteligência possível - e toda realidade inteccionável por nós - constituem uma relação do sujeito e do objecto...*”.

E mesmo os filósofos, como Mach, que identificavam os objectos com complexos de sensações, não negavam a existência da matéria. Subjugavam-na ao sujeito, ao considerarem-na como determinada neste através das sensações nele provocadas.

Mach negou a existência dos átomos, não por ser imaterialista, mas porque era positivista, isto é, só acreditava em factos empíricos, e não reconheceu aos átomos suficiente evidência empírica. Se vivesse hoje, depois de observar fotografias de átomos, Mach não negaria certamente a sua existência.

Por tudo isto, achamos incorrecta uma dicotomia materialismo-idealismo, e preferimos subscrever a *relação dialéctica realismo-idealismo, objecto-sujeito*. Entendemos que tanto Einstein como Bohr têm perfeita consciência de que o conhecimento físico exige experiências e teorias, factos e hipóteses, medições e análise reflexiva antes e depois das mesmas, estando **indissociavelmente ligados sujeito e objecto**. Ambos têm consciência de que **medir é perturbar**. A diferença entre eles é muito mais *ontológica* do que *epistemológica*.

Einstein acreditava na existência de uma realidade causal subjacente; as partículas, se não fossem perturbadas, comportar-se-iam de um modo racional, inteligível e determinável.

Bohr, pelo contrário, não acreditava nessa realidade racional e determinável subjacente aos factos que a experiência revela; os factos que aparecem, tal como aparecem e as leis estatísticas que os governam, são a realidade última, o indeterminismo é um facto fundamental e intrínseco da matéria.

Bassalo refere exemplos do desentendimento entre os realistas e os idealistas quanto à interpretação de teorias físicas (com cada um a defender a sua filosofia). Esse desentendimento deve-se ao facto de uns e outros teimarem em não ver que qualquer teoria encerra aspectos idealistas e realistas na medida em que se referem a ideias construídas pela mente humana acerca de determinadas realidades que sentem existir no mundo exterior.

Concretizemos com um exemplo: a *teoria dos átomos*. Logo na designação, temos a ideia (a teoria) e o real (os átomos), indissociavelmente ligados. Reparemos que a referida teoria, sem os átomos, não era nada, e os átomos, sem teoria, eram ficção. A teoria dos átomos nasceu com os atomistas, mas logo à partida a ideia e o real estão abraçados. Há certamente ideias e observações do mundo exterior envolvidas (o poema de Lucrecio dá-nos uma boa imagem disso, com metáforas como a do rebanho).

Essa ideia evoluiu porque o mundo também evoluiu e proporcionou outros objectos reais, que não apenas rebanhos, mas balanças, corpos materiais mais ou menos puros para analisar, etc., sem os quais a teoria não teria avançado com Dalton. Mas o corpo puro e a balança também são, eles próprios, sínteses de ideias e objectos reais.

Esta relação dialéctica prosseguiu e a teoria foi-se desenvolvendo com base em ideias e objectos reais cada vez mais evoluídos, fruto do progresso científico.

Seria impossível desenvolver a ideia de átomo sem a realidade do acelerador de partículas, mas também não haveria o acelerador real de partículas sem a ideia de átomo. Hoje já foi possível fotografar átomos (testemunho objectivo da sua realidade), mas a realidade do átomo já existia para os físicos, e isso não significa que a ideia de átomo ficasse mais subjugada à realidade do átomo.

A ideia evoluiu e continua a evoluir e hoje atingiu um tão alto grau de esoterismo que apenas alguns especialistas, dominando particularmente uma **linguagem** própria do átomo, têm uma ideia suficientemente evoluída, sendo que é essa ideia que traduz a realidade do átomo. E assim, nesta relação evolutiva, dialéctica, entre ideal e real, se construiu a ciência do átomo. O átomo é uma ideia. O átomo é uma realidade. Ideia-átomo e realidade-átomo envolveram-se num abraço que foi espiralando e evoluindo no tempo. E o mesmo sucede com as outras coisas do Universo.

O paradigma filosófico actual acerca da Física, que resultou principalmente da filosofia da Escola de Copenhaga (e põe em causa o próprio causalismo), é predominantemente idealista - demasiado idealista para o nosso gosto, conforme transparece deste nosso trabalho. Paradoxalmente, a grande maioria dos físicos continua a assumir, mais ou menos inconscientemente, ideias filosóficas incompatíveis com essa escola, sem que ponham, no entanto, em causa os fundamentos da Mecânica Quântica. Há aqui uma contradição que esperamos que há-de ser eliminada.

E quanto aos professores de Física? Para pesquisar o seu pensamento acerca da natureza da Ciência, e se, de facto, eles possuem uma visão demasiado empirista e realista do conhecimento físico, convidámos uma amostra de professores a responder a uma escala de graduação («*rating scale*»). O instrumento de pesquisa e os resultados obtidos constam do Apêndice 2 a este trabalho. A análise desses resultados é feita na secção 5.3.

Para terminar esta secção, aqui ficam, em destaque, as ideias mais importantes de que partiremos para a discussão do último problema epistemológico que nos propusemos debater:

- O mundo exterior existe. O seu conhecimento é uma construção, simultaneamente individual e social, da mente humana.
- A essência do conhecimento do mundo está numa dialéctica entre objectos e ideias, entre experiência e raciocínio: dela resulta a construção de relações entre conceitos, procurando traduzir relações entre realidades.
- No processo de construção do conhecimento físico em que está envolvida a comunidade dos físicos, cria-se uma «consciência científica» dinâmica e evolutiva a respeito do conhecimento válido, com base numa interacção entre experiências e ideias comunicadas em congressos e em livros científicos.
- A apreensão por cada físico do conhecimento científico é um assumir, em particular, dessa consciência científica, o que é sempre um processo idiossincrásico. Neste há uma componente pessoal em que intervêm factores como a experiência pessoal de cada um, as ideias prévias que possui, os sentimentos, as emoções e a vontade próprios.
- Não há um método científico, mas, sim, um espírito científico que cada aprendiz da ciência vai adquirindo e que lhe permite o acesso ao conhecimento científico válido, de modo a contribuir eventualmente para a sua construção.

3.15. O problema da validade e da demarcação do conhecimento físico

Vamos finalmente debruçar-nos sobre as últimas questões que nos propusemos debater, como sejam:

O que é que distingue a Ciência da não-Ciência? Em que nos baseamos, por exemplo, para afirmar que a Astronomia é uma ciência e a Astrologia não o é? Em que critérios assenta a validade do conhecimento científico, e, particularmente, o conhecimento característico das ciências físicas?

Vamos começar, como sempre fizemos, por abordar estas questões numa perspectiva histórica.

3.15.1 Diversos conceitos de verdade e modos de a ela aceder

O problema da separação entre Ciência e não-Ciência é conhecido na Epistemologia por *problema da demarcação*. É antigo e complexo, e passa pela fundamentação das mais variadas demarcações, como sejam, por exemplo: Filosofia e não-Filosofia, Filosofia naturalista e Filosofia humanista, Ciência e Filosofia e Ciência e não-Ciência. Para termos uma ideia como esta questão evoluiu nos últimos séculos, basta vermos que no século XVIII a Química ainda era considerada uma arte sistemática e não uma ciência pelo maior filósofo desse século, Kant.

A lenta e difícil separação da Filosofia do mito, que se iniciou com o «milagre grego», marcou o início da demarcação da *Filosofia*, a «mãe da Ciência». Os gregos acreditavam na distinção clara entre a *essência* e a *aparência* das coisas. Para que o conhecimento filosófico fosse autêntico, nos conduzisse à verdade, ele teria de atingir a essência das coisas, a sua verdadeira e autêntica natureza, o que elas são em si. O atingir a essência funcionava, pois, como o grande critério que

permitia distinguir o conhecimento dotado de certeza apodíctica, o único merecedor de se chamar científico, do conhecimento duvidoso.

O problema que desde logo se coloca é este. O que garante que o conhecimento atingiu a essência das coisas?

Os **primeiros filósofos naturalistas** gregos eram, como vimos, realistas ingênuos. Eles e todos os **filósofos empiristas** que sempre estiveram mais ou menos próximos das ciências da Natureza tinham um **conceito transcendente de verdade** que consiste na **concordância do conteúdo do pensamento com o objecto** sobre o qual se debruça. O conhecimento verdadeiro é o que dá um retrato completo e autêntico da realidade.

Mas desde logo aparece o conceito contrário... o **conceito imanente de verdade**, em que a verdade do pensamento está na sua **concordância com as leis** que o regem. Os grandes pensadores **racionalistas** gregos, fascinados pelo rigor da Matemática, viam nesta o garante da verdade. A **Matemática** era o **modelo da ciência verdadeira**. Fornecia as leis e as normas que regem o pensamento e respeitava-as escrupulosamente. Era fundamentalmente com base nela, e não nos sentidos, que se atingiria verdadeiramente a essência dos fenómenos. Vimos como os pitagóricos desenvolveram a Matemática, convencidos de que a essência do próprio mundo era uma essência matemática. Esta dicotomia entre uma *verdade transcendente* e uma *verdade imanente* foi mais um «biombo» a separar os filósofos empiristas dos racionalistas.

Até **Aristóteles** não havia uma clara demarcação entre a Matemática e a Física, mas sentia-se já uma demarcação entre uma **filosofia naturalista**, voltada essencialmente para o mundo exterior, e uma **filosofia humanista**, cuja preocupação central era o ser humano. Esta última distinção era muito mais uma questão de objecto do conhecimento do que de filosofia inerente a esse conhecimento.

Aristóteles, por exemplo, distinguia com clareza a **Física**, como estudo dos seres de existência real e dotados de movimento, a **Matemática**, ou estudo das entidades que carecem de existência real e não estão sujeitas a mudanças, e a **Teleologia**, que tinha por objecto o estudo da entidade dotada de existência real mas não sujeita a movimento ou qualquer mudança.

Porém, Aristóteles, ao estudar cuidadosamente os processos biológicos, entendeu que eles eram presididos por uma finalidade interna que os dirigia. Isto marcou toda a Filosofia aristotélica, estando toda ela inspirada num **modelo teleológico da Natureza: tudo, nesta, caminha para um fim, tende a alcançar uma finalidade.**

Este modelo teleológico está bem patente na Física aristotélica, onde o movimento natural dos corpos é comandado pela sua tendência para um fim - o seu *lugar natural* no Universo.

Como vimos, surgiu ainda na antiga Grécia, com os **sofistas**, a ideia de que a verdade absoluta não existe ou, se existe, o ser humano não tem acesso a ela. Os sofistas acreditavam que as **leis naturais**, aquilo que a Física ambicionava descobrir, eram uma **criação humana**, não procedendo dos deuses como afirmavam os pensadores mítico-religiosos, nem estando vinculadas a uma ordem do Universo, como pensavam Heraclito e outros.

Este ceticismo sofista era a manifestação do seu desânimo perante a diversidade de teorias opostas e incompatíveis acerca do Universo físico e do modo de conhecer a verdade acerca dele. Enquanto Aristóteles e seus seguidores entendiam que o garante da verdade do conhecimento está na observação experimental e na lógica formal, os pitagóricos e os platónicos viam na Matemática o processo de ascender à verdade.

Toda a **Idade Média** foi dominada pela integração da **Filosofia grega** no **Cristianismo**. A primeira punha **Deus em relação com o Cosmos**, ou como

Inteligência ordenadora (Anaxágoras e Platão), ou como *Motor e Fim* (Aristóteles), ou ainda como *Razão cósmica* (Estoicismo). A religião cristã colocava, como sabemos, **Deus em relação com a História** (*Deus providência e Deus feito homem*). Foi Santo Agostinho quem estabeleceu essa integração, voltado para o idealista Platão.

Santo Agostinho apelava à **interiorização** como modo de ter **acesso à verdade** (*“Se queres saber onde encontra o sábio a sabedoria, responder-te-ei: em si mesmo”*). Quando o ser humano se volta para si mesmo, autotranscende-se e tem assim acesso às Ideias que se encontram contidas na inteligência divina. É a alma e só esta que conhece as Ideias imutáveis e reais acerca do Universo. No fundo, o **garante último da verdade** acerca do mundo, incluído o mundo físico, estava em **Deus**.

Foi esta a doutrina que marcou todo o pensamento filosófico até ao século XIII, e influenciou ainda grandes pensadores da Idade Moderna, onde vemos **Descartes**, por exemplo, a recorrer a um **Deus não enganador** para garantir a verdade do seu método.

O sistema filosófico resultante da referida integração continha contradições internas que, como sempre sucedeu na história do pensamento, estiveram na base da sua ruína.

3.15.2 A demarcação entre Filosofia e Teologia

No **século XIII** iniciou-se uma clara demarcação entre a Filosofia e a Teologia. É nesse século que **São Tomás de Aquino** se envolveu em grande polémica com os averroístas latinos por um lado, e os franciscanos agustinistas por outro, começando aí o fim da subjugação da razão à fé, característica da filosofia agustinista, e com ela o início de uma nova demarcação entre a Filosofia - o reino do entendimento, e a Teologia - o reino da fé.

Em São Tomás de Aquino, a demarcação Filosofia-Teologia é completa quanto à forma de conhecimento, mas incompleta quanto aos conteúdos. De facto, a fé e o entendimento são consideradas formas diferentes de conhecimento e exercem-se nos respectivos domínios, mas há questões comuns. O entendimento humano tem como objecto fundamental a essência das realidades sensíveis e elabora os conceitos a partir delas. A fé é uma forma de apropriação da realidade divina. A partir de aí, o pensamento filosófico-cristão característico do mundo ocidental passou a orientar-se pela filosofia tomista.

Os **nominalistas do século XIV** demarcam completamente a Filosofia da Teologia e não aceitam a realidade das essências ou conceitos universais: o homem, a árvore, etc. **A validade do conhecimento já não é garantida por uma consciência**, seja ela ou não divina, **mas pelos próprios objectos** sobre os quais incide o conhecimento. Ao pensarem desta forma, tornam-se em autênticos precursores da demarcação entre Ciência e Filosofia ao anteverem para aquela a necessidade de investigação experimental. As primeiras grandes afrontas científicas à Física aristotélica iniciaram-se com os nominalistas de Paris, como vimos.

3.15.3 O surgimento de critérios de demarcação da Ciência

A filosofia crítica de **Francis Bacon** relativamente à atitude aristotélica e, fundamentalmente, a defesa que fez de um método baseado numa *lógica indutiva* para combater os preconceitos e erros que ofuscavam o conhecimento peripatético, influenciou de tal modo toda a Filosofia da Idade Moderna que ainda hoje perduram resquícios do seu trabalho na questão da demarcação entre Ciência e não-Ciência.

Para Bacon, o *objectivo da Ciência* distingue-se por ser o conhecimento das «formas». Bacon refere-se às *formas* como *leis objectivas dos fenómenos* (90). Para o conhecimento destas formas, Bacon preconizava um método extremamente concreto e objectivo baseado no uso de **tábuas**. Eram estas que **garantiam a validade** do conhecimento científico.

Apareceu, assim, um dos grandes critérios históricos de distinção entre a Ciência e a não-Ciência: o **critério da objectividade**. A partir de Bacon, a Ciência começou a querer afirmar-se autónoma da Filosofia com base na procura de uma objectividade metodológica que a Filosofia não possuía, conseguida à custa de “*uma investigação comum e planificada*” (Cordon e Martinez, 1984, p. 41).

Com o trabalho de Bacon e os trabalhos de outros filósofos nele inspirados, enraizou-se a ideia de que é possível demarcar a Ciência com base num método que garante a sua objectividade: o *método científico*. Este é, como já dissemos, um mito. Não existe um método único de fazer ciência, conforme muitos físicos e epistemólogos da Física têm realçado (Holton, 1989, pp. 258 a 260).

Mais do que o método defendido por Bacon, ou qualquer outro pretenso método de fazer ciência, o que surgiu no período renascentista foi um novo espírito, a que poderemos chamar verdadeiramente científico, espírito esse que já caracterizámos atrás. Foi a partir do surgimento desse **espírito científico**, bem enraizado em homens como Galileu, Kepler e Newton, que a Ciência, particularmente a Física, se destacou para sempre da Filosofia. O uso sistemático da Matemática e da experimentação, aliado a uma mais eficiente transmissão da cultura científica, tornou mais rigoroso o estudo dos fenómenos naturais e foi decisivo na demarcação da Ciência.

Com o avanço da Ciência Moderna começaram a despontar diversos critérios que distinguem a Ciência da não-Ciência. Um desses critérios é a **consensualidade fundamental** das teorias científicas, a qual é fruto da sua *validade universal*. Enquanto que os filósofos continuaram a discordar uns dos outros acerca dos principais problemas que os preocupavam, os cientistas foram-se pondo de acordo a respeito das principais teorias da Ciência como, por exemplo, a de Kepler do sistema solar, a de Galileu da queda dos graves e a de Newton da gravitação.

Um outro aspecto distintivo que também se começou a manifestar desde logo foi a **simplicidade** das leis científicas. Este outro critério, muitas vezes usado para distinguir a Ciência da não-Ciência, tem sido criticado por muitos pensadores, inclusive por alguns grandes cientistas.

Para além da *objectividade*, da *universalidade* e da *simplicidade*, há mais dois outros critérios fundamentais que se destacaram logo com os primeiros modelos científicos, inclusive com modelos antigos e entretanto rejeitados como foi o caso do modelo ptolomaico: a **positividade** e a **flexibilidade**. Um modelo científico é positivo quando tem um total e profundo respeito pelos dados da observação experimental e se procura adaptar escrupulosamente a eles (foi o caso, por exemplo, do modelo de Kepler, que não colocou o planeta Marte numa órbita circular, como era o desejo platónico do seu criador, porque tal ocasionaria uma discrepância de 8 minutos de arco). E um modelo é flexível quando procura arquitectar-se de tal modo que possa ir respondendo com pequenas correcções à medida que os dados vão mudando com o progresso da técnica de observação e experimentação (recorde-se como o modelo de Ptolomeu se foi moldando aos dados cada vez mais exactos com a introdução de novas esferas).

Outro aspecto que demarcou o pensamento científico do não-científico, particularmente do pensamento filosófico, foi o **tipo de questões** a debater. A Ciência newtoniana deixou de procurar responder a questões globalistas do tipo causalista ou finalista («*Porque* há o movimento da Terra?», «*Para que* há a aceleração de queda?») para centrar a sua atenção nas descrições físicas, com base em modelos («*Como* se move a Terra em torno do Sol?»).

Ao dizermos que não se vislumbra na história da Ciência um método científico, não estamos a afirmar que os cientistas trabalhavam caoticamente ou sem projectos. É claro que Galileu, tal como Kepler e todos os cientistas modernos, trabalharam e trabalham com projectos. Galileu, por exemplo, tornou muito claro que através de um projecto, de hipóteses e de boas ideias é possível escolher-se as características dos fenómenos que importa observar e medir.

É isto que distingue a **experimentação** característica da Ciência (envolve um projecto, o isolamento de sistemas e o controlo de variáveis) do **empirismo** ingénuo característico da velha Filosofia que procurava ser fiel aos fenómenos na sua globalidade, tendo então que introduzir crenças e modos de pensar altamente subjectivos, geralmente assumidos por tradição e educação.

Não podemos afirmar que, com a Ciência renascentista, surgiu um método experimental como receita para fazer ciência, mas há que reconhecer que surgiu a experimentação com uma importância que jamais tivera.

3.15.4 A validade do conhecimento nos séculos XVIII e XIX

Já afirmámos que Deus é para **Descartes**, e outros **racionalistas** que se lhe seguiram, o garante de que a certas ideias concebidas pela mente humana correspondem realidades extra-mentais. É essa Ideia inata suprema que, em última instância, confere a validade ao nosso pensamento, é ela que garante a correspondência entre a ordem do pensamento e a ordem da realidade (independentemente da forma que essa ideia de Deus assume, variável de filósofo para filósofo).

Para os filósofos **empiristas** do século XVIII, a validade do nosso conhecimento do mundo exterior reside essencialmente na sua génese sensorial e deve procurar-se encontrar na forma como se desenrolam os processos psíquicos da mente humana. Começa aí o germe da Psicologia das percepções, como estudo considerado fundamental para garantir a correspondência entre o mundo representacional e o mundo real dos objectos exteriores, isto é, entre o produto e a origem do nosso conhecimento (91).

Com o **empirismo** e o **sensismo***, o conhecimento científico passou a distinguir-se do filosófico por se considerar, como nunca, limitado às impressões do mundo exterior.

As ideias que possuímos só têm valor se procedem de impressões. O garante da veracidade dessas ideias está na comprovação de que elas provêm efectivamente de impressões. Para tal, em termos de Física, nada melhor do que experimentar com todo o cuidado e recolher o máximo de dados sensoriais possíveis.

A Ciência viveu muitos anos como filha da Filosofia e a socorrer-se do pensamento dela como garante do seu próprio pensamento. Mas, por sua vez, a partir do momento em que adquiriu o seu estatuto de independência, passou a servir de base ao pensamento filosófico. É notória a influência que a Ciência exerceu no pensamento filosófico de Descartes, de Leibniz, de Pascal, e muitos outros. Mas é, talvez, com **Kant** que passamos a dispor claramente de uma teoria filosófica da Ciência, uma reflexão fundamental acerca do pensamento científico de cada época. A Filosofia kantiana é, em grande parte, uma crítica profunda sobre a Física newtoniana, o paradigma da época. Ao discriminar entre *fenómenos* e *númenos* (coisas em si), Kant **modificou o critério de cientificidade**. *A Ciência deixou de ser, a partir dele, e definitivamente, a procura da verdade acerca da essência do mundo físico exterior. Passou a ser a apreensão dos fenómenos científicos tal como eles se revelam ao espírito humano.*

Já dissemos que a Ciência, segundo Kant, é principalmente a procura da fundamentação de determinados tipos de afirmações ou juízos. A sua validade depende dessa fundamentação. Os **juízos analíticos**, assim como os **juízos sintéticos** que constituem **os princípios fundamentais da Ciência, não se fundamentam em qualquer método experimental**, por mais perfeito que ele seja, pois são, segundo Kant, juízos *a priori*. **A experimentação serve apenas para fundamentar, e assim validar, os juízos sintéticos *a posteriori*.**

O **fenomenalismo** (a suposta *essência* ou realidade a conhecer fica reduzida ao *fenómeno*, aquilo que se manifesta de facto na experiência) e o **nominalismo** (as realidades são os objectos concretos e singulares) influenciaram e ainda influenciam todo o pensamento filosófico acerca da Ciência a partir de Kant.

Após o trabalho de Comte, a «*ciência positiva*» passou a ser considerada como a forma de conhecimento real e autêntica, útil, precisa e organizada, e, como tal, um modelo para toda a forma de conhecimento.

Levada a uma forma extrema, como estabelecimento de factos individuais a partir de dados sensoriais (positivismo de Mill), ou ficando-se por uma forma mais moderada (o estabelecimento pelo pensamento de leis empíricas a partir da relação de factos empíricos), a «*ciência positiva*» é o **conhecimento dos factos**. A sua validade reside apenas nestes. **Dispomos de factos experimentais, de evidências empíricas, o conhecimento é válido**. Caso contrário, o conhecimento não tem validade (92).

3.15.5 A validade e a demarcação da Ciência no século XX

No **atomismo lógico de Russel**, a validade científica refere-se à linguagem, é uma **validade proposicional**. Se a linguagem que procura retratar a realidade corresponde, de facto, a um retrato fiel da mesma, constitui conhecimento válido. Como linguagem que é, traduz relações entre ideias e a sua validade está na exactidão das ideias e na sua coerência lógica. Por conseguinte, o discurso científico é válido quando as palavras que usamos traduzem, de facto, os objectos que procuram traduzir. Um exemplo: o conhecimento científico de um circuito eléctrico traduz-se por um discurso linguístico que engloba palavras como amperímetro, intensidade da corrente, série, paralelo, etc. Esse conhecimento é válido se as palavras (voltímetro, resistor, etc.) são aplicadas para traduzir, de facto, os objectos a que se referem, e se as afirmações produzidas com essas palavras (por exemplo, «o amperímetro intercala-se em série no circuito») são afirmações lógicas correspondentes a factos.

Os **empiristas lógicos** ou **neopositivistas** também fazem assentar a validade da Ciência na **validade das proposições** produzidas. Às antigas verdades de facto de Leibniz fazem corresponder as chamadas **proposições empíricas**, cuja validade depende totalmente da existência de factos de prova. Às verdades de razão de Leibniz correspondem as **proposições formais analíticas**, cuja validade é tautológica.

A demarcação entre a Filosofia e as diversas ciências baseia-se nos objectivos e na *verificabilidade* do significado das proposições. Assim, enquanto a Física tem por finalidade o estudo do mundo material, produzindo afirmações verificáveis empiricamente, a Filosofia é uma actividade (e não um sistema ou conjunto de doutrinas acerca da realidade) destinada a analisar e tentar esclarecer o significado das proposições, sem hipótese de verificabilidade empírica.

Com este **critério da verificabilidade**, o neopositivismo procura desqualificar toda e qualquer proposição metafísica, por não ser verificável empiricamente.

Colocam-se, porém, problemas a este critério da verificabilidade. Um deles é este: como verificar empiricamente uma *proposição universal afirmativa* se ela contém uma infinidade de exemplos? E um outro problema: o que se entende por verificar empiricamente o significado de uma afirmação, principalmente sobre algo que não diz respeito a nós? O que é, por exemplo, verificar o significado da afirmação «*aquele animal está doente*»?

Uma resposta possível que surgiu para este último problema dá pelo nome de **fisicalismo**. O fisicalismo estabelece que *toda e qualquer proposição empírica não directamente verificável pode ser transformada, sem perda de significado, em proposições expressas em linguagem física, isto é, em proposições observáveis empiricamente*. No caso do dito animal, a afirmação é equivalente a afirmações tais como : «a sua temperatura aumentou», «entrou em convulsões», etc.

Popper tentou resolver os problemas levantados ao critério de verificabilidade de uma maneira muito pessoal, estabelecendo o seu célebre **critério da falsificabilidade**. Segundo ele, *uma proposição tem significado do ponto de vista científico quando é possível mostrar-se empiricamente que é falsa*.

Com este critério, Popper resolveu o problema surgido com as *proposições universais afirmativas*, tais como esta: «os limões são amarelos». Como é possível verificar empiricamente que os limões são amarelos? Andar por todo o mundo a verificar limão a limão?!

Para Popper essa afirmação é cientificamente significativa, porque é possível provar-se empiricamente a existência de limões não amarelos (e que, portanto, a afirmação é falsa). E como, no entanto, tal falsidade jamais se verificou, aceita-se a afirmação como verdadeira.

Porém, ainda surgiu um problema após o critério de Popper, problema esse levantado pelas *proposições particulares negativas*, tais como esta: «há pelo menos um limão que não é amarelo».

O critério da falsificabilidade falha neste caso: não podemos andar por todo o mundo a mostrar que todos os limões são amarelos! Portanto, a falsidade da afirmação não é verificável empiricamente.

Para este tipo de afirmações passa a falar-se novamente em verificabilidade.... só que se decide classificá-la em *forte* ou *fraca*.

Na **verificabilidade forte**, aceita-se que a validade da afirmação é garantida pela experiência. É usada para afirmações cujo domínio empírico é perfeitamente controlável (exemplo: «Portugal possui o cabo mais ocidental da Europa»).

Na **verificabilidade fraca**, a experiência apenas concede a probabilidade de a afirmação ser verdadeira. É o caso, por exemplo, da afirmação acima produzida («há pelo menos um limão que não é amarelo»).

O **critério da verificabilidade**, na sua versão última, afirma que uma **proposição é cientificamente significativa quando é tradutível numa linguagem empirista ideal, ou seja numa linguagem composta exclusivamente por termos relativos a factos sensíveis e susceptíveis de serem observados.**

Popper acredita na existência de um mundo de conhecimento objectivo que existe para além do mundo mental de cada sujeito. Esse mundo objectivo tem determinadas propriedades. O conhecimento destas, por cada sujeito, é garantido por **princípios lógicos** e pelo **critério de falsificabilidade** aplicado pelo sujeito que estabelece o conhecimento.

Kuhn e Lakatos têm uma **visão mais cooperativa** do que Popper acerca do conhecimento. O critério para aceitação é, acima de tudo, o **escrutínio e aprovação da comunidade científica.**

Para **Kuhn**, a **Ciência demarca-se** claramente da Filosofia **pelo seu desenvolvimento** através de paradigmas e revoluções científicas. Os problemas científicos vão surgindo e vão mudando à medida que a Ciência se constrói. Ao contrário, a Filosofia discute os mesmos problemas ainda que com novos dados que a Ciência lhe proporciona.

A **Filosofia analítica actual** não tem a pretensão de conhecer a realidade em si, e, como tal, guia-se por um **critério de verdade imanente**. Procura analisar os discursos científicos acerca da realidade e garantir a coerência lógica dos mesmos. Além disso, atribui importância às diversas dimensões da vida humana e não apenas à dimensão representativa ou intelectual. Mais ainda: a Psicologia cognitiva actual aponta no sentido de que as outras dimensões da vida humana, como sejam a dimensão afectiva e a dimensão volitiva afectam a componente intelectual, o que implica uma desvalorização da objectividade como critério de demarcação.

3.16. As teorias físicas têm um valor normativo e não um valor axiológico - 8º Princípio

O conhecimento físico de um fenómeno envolve uma relação epistemologicamente complexa entre o observador e o fenómeno que levanta diversos problemas.

Assim, logo à partida abstraímos um sistema em estudo do resto do Universo e seleccionamos apenas determinados factores dos que influenciam o fenómeno de modo a lidar com ele matematicamente.

Pese embora o facto de o poder de cálculo ter crescido extraordinariamente com os modernos computadores, e nos ser permitido recorrer a métodos numéricos que possibilitam resolver problemas até há pouco tempo insolúveis, acabamos sempre por modelar a realidade que é complexa.

Além disso, o estudo de um fenómeno físico envolve experiências e medições, e estas exigem que o sujeito interfira de algum modo com o próprio objecto que pretende conhecer. Essa interferência é uma facto fundamental, pelo que o erro experimental é absolutamente inevitável. Tudo o que as melhores medições poderão garantir é que a estrutura matemática que se pretende corroborar cai dentro de uma zona de indeterminação experimental.

Por outro lado, as características intelectuais, afectivas e volitivas próprias de cada sujeito, as suas idiossincrasias, tornam a apreensão do significado do objecto um acto psicologicamente muito pessoal.

E, quando isto não bastasse para complicar, levantam-se problemas de ordem lógica ao conhecimento. Com efeito, o que o sujeito faz, ao investigar e produzir conhecimento acerca de um fenómeno, é construir uma **representação**, relacionando, de modo lógico, conceitos que já possui com outros conceitos que para ele serão novos. É a lógica que responde (e, mesmo assim, de modo incompleto) perante a coerência dos passos dedutivos do raciocínio utilizado para estabelecer essa representação do fenómeno.

Outro problema, ainda, é o da exactidão da representação do fenómeno estudado, isto é, em que medida a representação construída concorda com o fenómeno que pretende representar. E este problema cai na esfera ontológica, na medida em que tem que ver com a verdadeira natureza do fenómeno, discutindo a questão de a construção mental acerca do fenómeno ser ou não ontologicamente verdadeira, isto é, corresponder ou não a hipotéticas características do fenómeno independentes do sujeito que as investiga, o que poderíamos designar por características absolutas do fenómeno.

E é esta questão ontológica o grande problema que fica por resolver em termos filosóficos numa época em que a metaciência aponta claramente no sentido de que o mundo objectivo não seja plenamente cognoscível.

Acontece que o conhecimento científico também envolve troca de informação dentro da comunidade científica: é aquilo a que poderemos chamar uma **intersubjectividade**. Há, como já afirmámos, uma «**consciência científica**» dinâmica, dentro da comunidade, que serve de referente para o conhecimento. Ela vai-se construindo paradigmaticamente através das experiências e das ideias que são comunicadas nos congressos e nas revistas e livros científicos.

O conhecimento de um dado facto isolado, só por si, carece de validade, dada a subjectividade inerente. Conhecer o Universo, penetrar nas suas inter-relações, exige o conhecimento integrado de um grande número de factos. É, como já afirmámos, a **coerência interna** do conhecimento de um vasto leque de factos relacionados como consequência da investigação da comunidade científica, é o poder **abarcар um grande número de factos experimentais numa mesma estrutura conceptual** baseada num reduzido número de princípios simples, que confere **validade** ao conhecimento.

A referida consciência científica comunitária alicerça-se nesta coerência. Quando vemos os mais diversos resultados, provenientes das mais variadas fontes, confluírem num todo harmonioso e coerente, passamos a acreditar que o conhecimento é válido.

A validade de um novo conhecimento num ramo científico está na sua coerência com essa «consciência científica» e é ditada, portanto, pela comunidade científica que trabalha no mesmo ramo. O critério de valor é um critério de aceitação por uma comunidade, e não um critério de veracidade absoluta que é inexistente.

Evidentemente que essa aceitação do novo conhecimento, construção humana, por seres humanos, envolve diversos aspectos. Para não falar nos mais variados problemas importantes que se levantam do foro sociológico, iremos só focar alguns aspectos também importantes da aceitação do novo conhecimento que têm que ver com o próprio conhecimento em si mesmo.

Em primeiro lugar, o conhecimento envolve uma relação entre definições e conceitos através de uma lógica da linguagem, incluindo a linguagem formal da Matemática. Toda a **lógica** tem de ser **verificada e aceite como correcta**.

Em segundo lugar, e porque não há nenhum sistema lógico que não envolva pelo menos uma afirmação que tem de ser aceite axiomáticamente (de acordo com o teorema de Godel), há que admitir hipóteses à partida. A validade de uma teoria, por mais rigorosa que seja do ponto de vista lógico, depende necessariamente da **validade de hipóteses**, como já dissemos. Basta uma hipótese não ser válida para toda a teoria cair por Terra.

Isto mostra a importância das hipóteses em ciência. **As hipóteses e os modelos que com elas se constroem são o coração da Física**. As hipóteses têm de estar muito bem fundamentadas e, mesmo assim, a validade final da teoria é concedida pela experimentação. E porquê? **Uma teoria científica é tanto melhor quantas mais consequências refutáveis experimentalmente prever, com um mínimo de hipóteses à partida**. Caso essas previsões não sejam refutadas experimentalmente, a teoria é aceite.

A não garantia de uma verdade absoluta para as teorias físicas, seja ela transcendente ou imanente, não retira validade às teorias científicas paradigmaticamente estabelecidas nem nos faz cair num relativismo epistemológico. Entendemos que, com boa educação científica, os seres humanos são perfeitamente capazes de se porem de acordo acerca dos conceitos e dos princípios essenciais de uma ciência exacta como é a Física. Porém, cada ser humano tem de os construir por si, tem de os apreender ele próprio, e não é suficiente que lhe sejam ensinados para serem apreendidos.

Só depois de interiorizar e enraizar um conceito científico, cada ser humano está apto a comungar por inteiro da consciência científica acerca desse conceito.

3.17. A demarcação entre Ciência e não-Ciência nem sempre é nítida

- 9º Princípio

Os aspectos mais consensuais que caracterizam actualmente a ciência já foram referidos e são os seguintes:

- **a Ciência é muito mais do que um conjunto de leis, uma colecção de factos; é uma criação do espírito humano (93);**
- **a Ciência é um processo, é um devir, em que as novas ideias vão sendo construídas com base na interacção das ideias previamente existentes com a experiência, e desempenhando essas ideias prévias um papel importante na referida construção (94).**

Muitas outras características são tradicionalmente consideradas relevantes para que um dado conhecimento possa ser considerado científico. Vamos analisar essas características, uma a uma, para tentar demarcar o melhor possível esse conhecimento científico.

Comecemos pelo chamado «**método científico**». É vulgar ouvir-se por exemplo afirmar que a Astrologia não é uma ciência porque não usa o método científico. Mas o que é o método científico? Por onde começa e por onde acaba? Começa pela observação? Continua pela verificação de regularidades? Acaba por efectuar previsões? Então um bom astrólogo também poderá deixar crescer as barbas para «armar à sábio», começar por observar os astros (actualmente com o refinamento da Astrologia, há astrólogos que usam telescópios e programas de computador com mapas do céu e com dados científicos sobre acontecimentos astronómicos passados e futuros), verificar regularidades, como por exemplo a passagem de um cometa, e acabar por fazer previsões tais como a de que a passagem do cometa faz com que vá acontecer uma desgraça. E se a desgraça mais tarde acontece, lá temos o nosso astrólogo a cotar-se como um grande cientista, que previu antecipadamente uma desgraça e ela aconteceu.

Não é certamente por aqui que vamos convencer os incrédulos de que o astrólogo em questão não passa de um adivinho. Falar num «método científico», que não sabemos bem o que é (até porque a Ciência não se cinge à Física), nem sabemos como o distinguir claramente de métodos não-científicos, não parece ser uma boa estratégia. Parece mais indicado referir uma **atitude científica** que, uma vez bem caracterizada, convence muito mais pessoas imparciais de que o astrólogo não a possui. E há outro tipo de argumentos, esses sim, convincentes, baseados no consenso proveniente de uma consciência científica, que a comunidade universal de astrólogos está longe de possuir. É, aliás, a argumentos deste tipo que Carl Sagan recorre no seu livro «Cosmos» para atacar a pretensa cientificidade da Astrologia (1984, pp. 64 e seguintes).

A **objectividade**, no sentido de que a Ciência tenta afastar do seu domínio qualquer componente afectiva e, portanto, subjectiva, é outra característica muitas vezes invocada para a demarcar. É claro que a Ciência tem de ser o mais objectiva que é possível, mas de forma alguma se pode considerar liberta de subjectividade.

Por maior que seja o esforço para tornar o conhecimento físico objectivo, consideramos impossível libertá-lo de um factor pessoal, por razões que já apontámos. A Ciência é construída (e vivida...) por seres humanos, e os sentimentos, as ideias prévias, em suma as características de cada ser, influenciam o modo como se organizam as suas próprias percepções do mundo.

Conhecemos bem a importância de cada obra científica, produzida por um ou mais seres de uma comunidade que negociam entre si as suas próprias ideias, na construção da **consciência científica** dessa comunidade. Sabemos bem como as ideias de cada grande físico influenciam as ideias de muitos outros. A objectividade da Ciência não passa pois de uma **intersubjectividade**, já que o conhecimento científico da comunidade dos cientistas, o que forma a referida **consciência científica** da comunidade de cientistas, acaba por residir nas convicções que os sujeitos dessa comunidade comungam entre si. Mas, nunca é demais insistir, trata-se de uma consciência dinâmica, porque aliada a esta comunhão de ideias existe sempre uma negociação permanente dentro da comunidade.

Outra característica da Ciência muito criticada é a sua **positividade**, que significa a total aderência aos factos, uma total submissão à experiência e um desprezo por toda a componente metafísica e especulativa no conhecimento. A positividade da ciência redundou na **operacionalidade** dos conceitos científicos, segundo a qual um conceito científico só tem valor se for definido operacionalmente, isto é, mediante uma série de operações físicas que envolvem experiências e medidas, pelo menos idealmente possíveis.

Todas as correntes filosóficas actuais põem em causa a validade do pensamento positivista acerca do conhecimento do mundo. As maiores críticas provêm de filósofos que valorizam a condição humana, e o papel do sujeito na construção do conhecimento, mas tais críticas também são numa boa parte comungadas por homens com boa formação cultural habituados a trabalhar com a metacognição (Novak, 1992, cap. 3) (95).

Concluimos, assim, que há uma incoerência entre a visão positivista que ainda continua a reinar na comunidade dos físicos e a reflexão filosófica actual acerca da Ciência.

O positivismo assenta no equívoco de que é possível construir-se uma ciência através da recolha de factos empíricos isolados. Muitos são os cientistas e filósofos que denunciaram esse equívoco. O matemático e filósofo **Bronowski**, por exemplo, argumenta do seguinte modo:

“Os filósofos positivistas tomaram por modelo esta tentativa (Bronowski refere-se à tentativa de Russell e Whitehead de fazer derivar toda a Matemática de um número finito de axiomas, incluindo ideias complexas como as ideias de contínuo e de infinito), imaginando o conhecimento como se fosse constituído por pedaços de factos particulares. Mas se a Matemática tem dificuldade na adaptação desta estrutura, é evidente que o conhecimento empírico nem sabe por onde começá-la. O nosso conhecimento não se obtém manifestamente a partir de pedaços particulares de informação, como seja, por exemplo, «isto é vermelho». A mente não parte destas experiências sensíveis mas sempre de conjuntos que as integrem, ou seja de coisas.

De outro modo como poderia reconhecer que é um livro aquilo para que olho e identificá-lo com o mesmo livro para o qual estava olhando antes de virar a página? O nosso conhecimento não é constituído como um mecano por minúsculos parafusos e cavilhas de experiência” (s/d, p. 143).

E **Gonseth** escreve o seguinte:

“Será legítimo, enfim, falarmos de uma ciência experimental, compreendendo apenas estritamente o conjunto dos factos da experiência indubitavelmente verificados e os processos de experimentação pelos quais eles foram obtidos? De facto, tal ciência não existe.

Quero dizer que não existe, no conjunto da ciência actual, um sector experimental que possamos retirar do conjunto mantendo-lhe uma coerência e uma significação autónomas. Pelo contrário, o aspecto experimental está inseparavelmente ligado ao aspecto teórico, e apenas tem valor numa íntima colaboração com este último” (1960, p. 15).

É uma constante histórica o facto de o pensamento científico e o modo de encarar o conhecimento do mundo ser influenciado por convicções metafísicas. Questões como a de a ciência do mundo físico e toda a sua metodologia ser encaminhada para fins práticos ou para fins teóricos de puro conhecimento da realidade têm que ver com convicções do tipo metafísico acerca do mundo.

Multiplicam-se os exemplos históricos em que determinadas convicções metafísicas influenciaram enormemente o pensamento.

Pelo que acabamos de ver, **não há fundamento filosófico para o facto de as ciências físicas estarem ainda actualmente tão impregnadas de positivismo,** que transparece pelo menos em muitos discursos escritos e orais de diversos cientistas. Entendemos que este facto, apesar de tudo, também tem os seus aspectos positivos. Assim, quando um físico, por exemplo, exige factos experimentais para rebater especulações metafísicas impostoras acerca de um problema científico, essa sua atitude (de «positividade») é positiva.

Quando, por exemplo, um físico assume, numa atitude positivista, um cepticismo religioso ou agnosticismo, também se nos afigura correcta essa posição, particularmente por combater o mau gosto de misturar Deus com a Física actual e/ou o pretensiosismo de provar cientificamente a existência ou a não- existência de um Deus.

Por outro lado, a operacionalidade dos conceitos também tem as suas vantagens. Com efeito, quando os conceitos são definidos operacionalmente, sempre que há uma discussão entre físicos acerca deles todos sabem aquilo que se está a discutir.

Porém, quando o positivismo é levado a um extremo doentio que procura privar os cientistas de toda a discussão filosófica em torno do conhecimento, torna-se limitativo e propiciador de uma imagem errada da Ciência. Deve-se ao positivismo excessivo o desprezo que certos maus cientistas revelam pela Epistemologia porque ela é uma **metaciência** e, como tal, é reflexiva e especulativa. Esquecem-se que a boa reflexão sobre a Ciência é útil à Ciência, do mesmo modo que a boa crítica de arte é útil à arte.

O **metaconhecimento científico** é tão antigo como a antiga Grécia, e cientistas que muito contribuíram para alargar as fronteiras do conhecimento foram grandes **metacientistas**. Um dos maiores exemplos foi Descartes, que viveu intensamente como poucos o problema da realidade sobre a qual se debruça o conhecimento científico. E só encontrou uma saída possível: Deus. Acreditou num Deus não enganador como garante da verdade absoluta acerca dos «objectos». Construiu, como sabemos, a sua ciência a partir da sua metafísica.

Hoje, temos de ser um pouco menos ambiciosos e mais positivistas que Descartes. Deveremos prescindir da verdade científica absoluta e partir da Ciência e do seu conhecimento possível se quisermos discutir a metaciência.

Lembre-mo-nos também que Newton, um dos maiores cientistas de sempre, também recorreu a Deus como garante da existência do espaço e do tempo absolutos, e Einstein costumava dizer com o seu ar de graça “*que Deus é subtil mas não é malicioso*”. Teremos, assim, uma noção da dificuldade com que se debateram grandes pensadores ao tentarem levar o conhecimento até à espinal medula dos fenómenos. Respeitemos o seu «*racionalismo*» por vezes exagerado, a sua fé excessiva no poder da razão, a sua atitude não positivista. E, sem confundir os campos, procurando ter consciência quando estamos a fazer ciência ou a reflectir filosoficamente, não nos privemos de especular metafisicamente, particularmente se essa especulação se debruça sobre um «objecto» que, por tão complexo, está ainda tão mal conhecido: o próprio conhecimento (96).

Falámos no excessivo racionalismo, tão excessivo que até introduziu o dado Deus pelo meio. Isto serve de motivo para nos debruçarmos sobre outra faceta da ciência do mundo físico, tal como ela é encarada actualmente. Não obstante toda a oposição da corrente empírico-positivista que ainda tem peso, o conhecimento científico actual acerca do mundo **«transpira por todos os poros» racionalidade**. Não significa isto que o racionalismo triunfou ao defender que na origem do conhecimento do mundo físico está a razão. Não quer dizer, como pensavam os antigos, que a mente tem a faculdade de apreender a *«verdade absoluta»*. Significa, sim, que a ciência do mundo que nos rodeia é uma construção do intelecto humano que não consiste em meros elementos empíricos. Traduz que a Ciência resulta de um esforço de tornar racional e compreensível o mundo cognoscível, através de um processo de elaboração de construções coerentes entre si e coerentes com os dados empíricos. Quer dizer que **a Ciência do mundo físico é a construção da mente humana que possui maior precisão, sem pretender orgulhar-se de conhecer o mundo com exactidão absoluta.**

Uma outra característica bastante marcante da Ciência é a sua forma muito peculiar de **anti-dogmatismo**. Esta faceta permite demarcá-la claramente das religiões e da Filosofia. Não é que a Filosofia seja dogmática, mas, repetimos, a Ciência tem uma forma muito própria de anti-dogmatismo. Que forma é esta?

As **teorias científicas** são sempre **revisíveis**, mas a sua revisibilidade vai passando pela **reformulação**, quase sempre **englobante** e **generalizante**, das teorias anteriores. As novas teorias procuram sempre englobar as velhas teorias no seu quadro conceptual. A Teoria da Relatividade Restrita, ao reformular a Física Clássica, acabou por a englobar como caso particular aplicado aos fenómenos em que as velocidades são pequenas relativamente à da luz no vácuo. A Teoria Electromagnética de Maxwell englobou a velha Óptica ao considerar a luz visível como uma parte de um espectro de ondas electromagnéticas. E muitos mais exemplos poderíamos dar.

O anti-dogmatismo da Ciência, que tem como inerência a sua revisibilidade, é a sua faceta mais apaixonante. Se a Ciência fosse um sistema perfeito e definitivo, um conjunto de dogmas indiscutíveis, perderia todo o seu fascínio.

Finalmente, referimo-nos ao critério que já atrás discutimos que demarca a Ciência da não-Ciência: a **verificabilidade**. Só por si, tem um valor muito questionável por partir de um equívoco: o de que é possível fazer corresponder a uma teoria científica um número finito de situações verificáveis pela experiência. O critério de **falsificabilidade** de Popper foi um passo importante, mas, por si só, também não resolveu totalmente o problema.

Concluimos, pois, que a questão da demarcação da Ciência é complexa e nem sempre tem resposta inquestionável quando se aplica a determinados conhecimentos.

Quando, há longos anos, aprendemos a distinguir os metais dos não-metais, foi-nos recomendado que não nos guiássemos apenas por uma das características, seja ela o brilho ou a resiliência. Cremos que essa recomendação também se justifica neste caso: **não nos deixemos guiar por uma característica apenas, quando queremos demarcar a Ciência da não-Ciência.**

FIM

DO

VOLUME I

Jorge António de Carvalho Sousa Valadares

**CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS
NO
ENSINO DA FÍSICA
À LUZ DA
FILOSOFIA DA CIÊNCIA**

*Dissertação de Doutoramento em Ciências da Educação
- especialidade: Didáctica da Física*

VOLUME II

UNIVERSIDADE ABERTA

LISBOA

1995

Jorge António de Carvalho Sousa Valadares

**CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS
NO
ENSINO DA FÍSICA
À LUZ DA
FILOSOFIA DA CIÊNCIA**

Volume II

*Dissertação de Doutoramento em Ciências da Educação
- especialidade: Didáctica da Física*

**Sob a orientação do Professor Catedrático
Doutor Armando Rocha Trindade**

UNIVERSIDADE ABERTA

LISBOA

1995

ÍNDICE GERAL

VOLUME I

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

<i>1.1. Contexto e motivação</i>	<i>13</i>
<i>1.2. Concretização do problema a investigar.....</i>	<i>16</i>
<i>1.3. Fundamentação da escolha do problema.....</i>	<i>18</i>
<i>1.4. Valor teórico desta investigação.....</i>	<i>24</i>
<i>1.5. Valor prático desta investigação.....</i>	<i>26</i>
<i>1.6. Fases da investigação</i>	<i>28</i>
<i>1.7. Algumas considerações de natureza ética.....</i>	<i>32</i>

CAPÍTULO II - PROBLEMATIZAÇÃO E METODOLOGIA

<i>2.1. O «vê» epistemológico.....</i>	<i>35</i>
<i>2.2. A questão central.....</i>	<i>36</i>
<i>2.3. Os acontecimentos/objectos.....</i>	<i>38</i>
<i>2.4. Os conceitos utilizados.....</i>	<i>40</i>
<i>2.5. Os princípios adoptados.....</i>	<i>42</i>
<i>2.6. A transformação de factos em dados e os juízos acerca dos mesmos.....</i>	<i>44</i>
<i>2.7. As teorias subjacentes e a mudança conceptual ocorrida acerca das mesmas....</i>	<i>45</i>
<i>2.8. Um lampejo da posição filosófica subjacente a este trabalho.....</i>	<i>46</i>

CAPÍTULO III- UMA REFLEXÃO EM TORNO DA FILOSOFIA DA CIÊNCIA

3.1	<i>Introdução.....</i>	51
3.2.	<i>Demarcação dos problemas a discutir.....</i>	54
3.3.	<i>O problema da possibilidade do conhecimento pleno da realidade exterior..</i>	57
3.3.1	Do dogmatismo dos primitivos gregos ao cepticismo nominalista.....	57
3.3.2	A autonomia da razão.....	61
3.3.3	Que conhecemos: a realidade ou simples ideias?.....	62
3.3.4	O criticismo kantiano.....	66
3.3.5	A Física do século XIX e o conhecimento positivo.....	67
3.3.6	As grandes críticas de Mach e Poincaré à Física newtoniana.....	69
3.3.7	A Física do século XX e o movimento analítico.....	71
3.3.8	O operacionalismo, o construtivismo e a visão actual da Ciência.....	75
3.4.	<i>A ciência física não pode ter como objectivo o conhecimento pleno da realidade exterior - 1ºPrincípio.....</i>	77
3.4.1	Nem cepticismo nem dogmatismo acerca do conhecimento do mundo físico.....	77
3.4.2	O criticismo moderno como resposta ao problema do conhecimento da realidade exterior	79
3.4.3	Alguns aspectos importantes do criticismo	82
3.5.	<i>O problema da origem do conhecimento físico.....</i>	86
3.5.1	Empirismo versus racionalismo	86
3.5.2	Breve história do racionalismo	87
3.5.3	Breve história do empirismo	95
3.5.4	Posições superadoras entre o empirismo e racionalismo	100
3.6.	<i>Há uma dialéctica entre a razão e a experiência no estabelecimento da ciência física - 2ºPrincípio.....</i>	112

3.7.	<i>O problema da essência do conhecimento</i>	123
3.7.1	O realismo	124
3.7.2	O idealismo	130
3.7.3	Posições históricas que procuraram uma superação entre idealismo e realismo	133
3.8.	<i>A Física é uma construção humana e dialéctica resultante da interacção entre o sujeito e o objecto, entre o pensamento e a acção - 3º Princípio</i>	153
3.9.	<i>O conhecimento físico de cada ser humano é uma construção pessoal e idiossincrásica - 4º Princípio</i>	159
3.10.	<i>O problema das formas, das motivações e da metodologia da Física</i>	168
3.10.1	A influência dos factores sociais na Ciência	170
3.10.2	A influência das concepções metafísicas	171
3.10.3	A dialéctica do conhecimento do mundo	172
3.10.4	A intuição, a dedução e a indução no conhecimento científico	174
3.10.5	Existência de concepções antitéticas acerca do mundo	177
3.10.6	São necessárias infra-estruturas para fazer funcionar os instrumentos do conhecimento	179
3.10.7	Características dos modelos científicos que prevalecem e os obstáculos epistemológicos que se levantam à mudança conceptual	183
3.10.8	As contradições teóricas dos modelos estão na base da mudança conceptual	186
3.10.9	As idiossincrasias dos cientistas e a dinâmica do erro na construção da Ciência	189
3.10.10	As grandes antíteses metodológicas na reflexão histórica sobre a Ciência	193
3.10.11	A superação metodológica na «Filosofia Natural» de Galileu e Newton	196
3.10.12	A Ciência procura a generalização conceptual a caminho de um modelo de estrutura racional do mundo	205

3.10.13	A Física é uma só, uma ciência teórico-experimental.....	208
3.10.14	Há dois níveis de pensamento que se revelaram fundamentais na história da Ciência.....	213
3.11.	<i>O pensamento vulgar antecede o pensamento científico e constitui um obstáculo à construção deste - 5º Princípio.....</i>	222
3.12	<i>Há um isomorfismo entre a construção do conhecimento físico por cada indivíduo e a construção do conhecimento físico ao longo da história - 6º Princípio.....</i>	224
3.13	<i>Não há um método científico, mas, sim, uma atitude científica. Hipóteses, modelos e experimentação interagem não linearmente - 7º Princípio.....</i>	230
3.14	<i>Na comunidade dos físicos e dos professores de Física assentaram ideias demasiado realistas e empiristas.....</i>	239
3.15.	<i>O problema da validade e da demarcação do conhecimento físico</i>	246
3.15.1	Diversos conceitos de verdade e modos de a ela aceder.....	246
3.15.2	A demarcação entre Filosofia e Teologia.....	249
3.15.3	O surgimento de critérios de demarcação da Ciência.....	250
3.15.4	A validade do conhecimento nos séculos XVIII e XIX.....	253
3.15.5	A validade e a demarcação da Ciência no século XX.....	255
3.16.	<i>As teorias físicas têm um valor normativo e não um valor axiológico - 8º Princípio.....</i>	259
3.17.	<i>A demarcação entre Ciência e não-Ciência nem sempre é nítida - 9º Princípio.....</i>	262

VOLUME II

CAPÍTULO IV - CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS NO ENSINO DA FÍSICA

<i>4.1. Introdução e problematização.....</i>	<i>285</i>
<i>4.2. Concepções alternativas nos alunos de Física.....</i>	<i>290</i>
4.2.1 Concepções alternativas acerca da grandeza força.....	291
4.2.2 Concepções alternativas acerca dos movimentos.....	305
4.2.3 Concepções alternativas acerca da inércia e da massa dos corpos.....	318
4.2.4 Concepções alternativas acerca da energia.....	326
4.2.5 Concepções alternativas sobre o calor e a temperatura.....	329
4.2.6 Concepções alternativas sobre a constituição corpuscular da matéria.....	331
<i>4.3. Características das concepções alternativas dos alunos.....</i>	<i>333</i>
4.3.1 A persistência das concepções alternativas.....	333
4.3.2 A homogeneidade e universalidade das concepções alternativas.....	335
4.3.3 A analogia entre concepções alternativas dos alunos e concepções históricas.....	336
<i>4.3.4 As concepções alternativas surgem muitas vezes escondidas pela linguagem técnica.....</i>	<i>345</i>
<i>4.4. Origens das concepções alternativas dos alunos.....</i>	<i>346</i>
<i>4.5. Conclusões a respeito das concepções alternativas dos alunos.....</i>	<i>368</i>
<i>4.6. Concepções alternativas dos professores de Física.....</i>	<i>371</i>
4.6.1 Concepções alternativas envolvendo o conceito de força.....	372
4.6.2 Concepções alternativas envolvendo o conceito de peso.....	381
4.6.3 Concepções alternativas acerca das leis de Newton do movimento...	392
4.6.4 Concepções alternativas acerca da energia e da relação entre o trabalho das forças e a variação da energia dos corpos.....	400
4.6.5 Concepções alternativas acerca do calor e da temperatura.....	414

4.6.6	Concepções alternativas acerca da massa.....	417
4.6.7	Concepções alternativas reveladas por professores de níveis elementares de ensino.....	424
4.6.8	Mais algumas ideias confusas e/ou incorrectas detectadas no ensino da Física em Portugal.....	426
4.7.	<i>Características das concepções alternativas dos professores.....</i>	433
4.7.1	A analogia entre as concepções alternativas dos professores e as concepções históricas.....	433
4.7.2	A persistência das concepções alternativas nos professores.....	439
4.7.3	A homogeneidade e universalidade das concepções alternativas dos professores.....	442
4.7.4	As concepções alternativas dos professores surgem muitas vezes escondidas por trás da linguagem técnica.....	445
4.7.5	Nas concepções alternativas dos professores existe uma falta de consistência interna e externa.....	448
4.8.	<i>Origens das concepções alternativas dos professores.....</i>	455
4.9.	<i>Conclusões a respeito das concepções alternativas dos professores.....</i>	483
4.10.	<i>Concepções alternativas em Física.....</i>	485
4.10.1	Concepções alternativas na história da Ciência acerca do conceito de massa.....	497
4.11.	<i>Características gerais das concepções alternativas em Física.....</i>	508
4.11.1	As concepções alternativas desempenharam um papel importante no desenvolvimento da Ciência	508
4.11.2	Muitas das concepções alternativas que surgiram na história da Física são iguais às que professores e alunos têm manifestado	509
4.11.3	Muitas das concepções alternativas que surgiram na história da Física revelaram uma enorme persistência	511
4.11.4	As concepções alternativas em Física têm um carácter generalizado e homogéneo	512
4.11.5	As concepções alternativas em Física têm subjacentes determinadas convicções geralmente de índole filosófica	514
4.11.6	As concepções alternativas em Física enquadram-se numa determinada estrutura conceptual	515

4.12. <i>Origens das concepções alternativas nas ciências físicas</i>	522
4.12.1 Na raiz das concepções alternativas está a natureza da Ciência	522
4.12.2 Alguns factores responsáveis pelas concepções alternativas na Física.....	528
4.13. <i>Conclusões acerca das concepções alternativas em Física</i>	542

CAPÍTULO V - JUÍZOS DE ÍNDOLE COGNITIVA E DE VALOR EDUCACIONAL. IMPLICAÇÕES NA EDUCAÇÃO CIENTÍFICA DOS ALUNOS DE FÍSICA

5.1.	
<i>Introdução</i>	547
5.2. <i>Resumo de algumas conclusões extraídas deste trabalho</i>	548
5.3. <i>Conclusões retiradas das respostas à escala de graduação («rating scale») administrada a professores</i>	555
5.4. <i>Juízos de índole cognitiva</i>	559
5.5. <i>Juízos de valor educacional</i>	564
5.6. <i>Implicações na educação científica dos alunos de Física</i>	566
5.6.1 O <i>curriculum</i>	566
5.6.2 O professor de Física	578
5.6.3 A avaliação educativa.....	587
5.6.4 A governança.....	590

NOTAS.....	593

CAPÍTULO I.....	595
CAPÍTULO II.....	601
CAPÍTULO III.....	605
CAPÍTULO IV.....	673
CAPÍTULO V.....	685

GLOSSÁRIO.....	689

BIBLIOGRAFIA GERAL.....	699

APÊNDICES.....	745

APÊNDICE I - PENSAMENTO ESPONTÂNEO DE PROFESSORES DO
ENSINO SECUNDÁRIO ACERCA DA RELATIVIDADE DE GRANDEZAS
MECÂNICAS

APÊNDICE II - CONCEPÇÕES EPISTEMOLÓGICAS DOS PROFESSORES
SOBRE O CONHECIMENTO FÍSICO

APÊNDICE III - O CONCEITO DE MASSA - INTRODUÇÃO HISTÓRICA

APÊNDICE IV - O CONCEITO DE MASSA - ANÁLISE DO CONCEITO

APÊNDICE V - A ENERGIA

APÊNDICE VI - ALGUNS ASPECTOS ESSENCIAIS SOBRE A ENERGIA

CAPÍTULO IV

CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS NO ENSINO DA FÍSICA

4.1. Introdução e problematização

No capítulo anterior tentámos fundamentar a ideia de que cada ser humano toma conhecimento do mundo exterior através dos «olhos da mente», tendo uma visão desse mundo que depende de diversos factores, a começar pela experiência de interacção com ele. Através das suas reflexões, das suas experiências de contacto com o meio ambiente e das suas interacções sociais, e influenciado por factores de índole cognitiva, afectiva e volitiva, cada ser humano vai construindo e reconstruindo as suas representações acerca do mundo.

Nascemos num ambiente cultural, geocêntrico e egocêntrico, e as nossas primeiras ideias, bem como as nossas primeiras acções (ideias e acções manter-se-ão sempre interdependentes...) têm a «marca» do ambiente em que nascemos.

Familiarizamo-nos com os entes e as coisas que nos cercam e vamos observando como evolui o mundo à nossa volta. Registamos factos, ouvimos quem nos rodeia, e passamos a ter as nossas primeiras representações do mundo. Estas representações baseiam-se numa aprendizagem pessoal, que ocorre desde que nascemos.

Por um processo de mudança conceptual que posteriormente discutiremos, as nossas ideias vão-se modificando. Quando chegamos à escola, essas preconcepções, essas primeiras representações do mundo, alicerçadas na intuição e no senso comum, muitas delas apreendidas significativamente, vão desempenhar um papel importante no modo como a aprendizagem das ideias cientificamente aceites se vai processar. É com dificuldade que a mudança conceptual vai ocorrendo, a caminho da apreensão das ideias paradigmaticamente aceites pela comunidade científica.

O facto de haver um conhecimento científico compartilhado por uma comunidade, que a evolução histórica do pensamento estabeleceu, não significa que esse conhecimento seja dogmático, inquestionável, eterno.

Por inerência da natureza da Ciência, traduzida no capítulo anterior, o seu conteúdo está permanentemente a ser problematizado, procurando-se contradições na sua estrutura conceptual, fazendo-se previsões acerca de fenómenos e sujeitando-se estas previsões ao veredicto da experiência.

Devido à confrontação de ideias, com base numa *interacção dialéctica entre teoria e experiência*, é de esperar uma evolução permanente no quadro conceptual de uma ciência como a Física. Por um lado, os físicos vão acompanhando mais ou menos essa evolução segundo os seus interesses. Por outro lado, o conhecimento individual de cada cientista, por mais que ele procure interiorizar e respeitar o conteúdo da ciência a que se dedica, tem também algo de idiossincrásico. Por tudo isto, é de esperar que haja concepções diferentes dentro da comunidade científica, em certos aspectos mesmo antitéticas.

Se na Ciência, como construção humana de validade normativa que é, devemos encarar com naturalidade a existência de concepções divergentes, no ensino da Ciência também elas deverão existir, quer entre professores quer entre alunos.

Cada professor conta com o seu processo pessoal de aprendizagem, teve e tem a sua experiência cognitiva pessoal que é determinante a respeito das ideias científicas que possui. Essas ideias vão ser «negociadas» com os alunos, que, por sua vez, também têm as suas próprias representações do mundo, mais ou menos empíricas e espontâneas, decisivas, como dissemos, para o modo como se processa a sua mudança conceptual. É suposto que esta mudança vai ocorrer, as ideias de cada aluno vão-se modificar à medida que ele progride no estudo da Ciência, mas a **investigação tem revelado de modo convincente que muitas das preconcepções dos alunos resistem tenazmente à mudança conceptual pretendida.**

Como síntese do que se acabou de dizer, referimos a frase que seleccionámos para o frontispício deste trabalho, a afirmação popperiana de *que “vivemos enclausurados nos referenciais das nossas teorias”*. Estas marcam a nossa maneira de ver o mundo.

É sobre a existência destas concepções distintas, na Física e no seu ensino, que nos debruçámos fundamentalmente nesta investigação. Procurámos conhecer e analisar algumas das concepções que divergem das que são consideradas cientificamente mais correctas num dado momento da construção do conhecimento científico e da sua aprendizagem.

Cingimo-nos, em termos de exemplificação, ao domínio da Mecânica, por razões já referidas. Partindo da análise dos exemplos estudados, tentámos discutir alguns problemas que se colocam a respeito dessas concepções díspares. As conclusões a que chegámos afiguram-se-nos generalizáveis a outros domínios da Física e a outras ciências.

Um problema importante sobre o qual nos debruçámos, e para o qual não tem havido uma resposta unânime, é o do **carácter ou natureza** dessas concepções físicas divergentes. Poderemos traduzi-lo do seguinte modo:

- *Essas concepções divergentes têm um carácter ocasional, assistemático, ad hoc, não têm qualquer fundamento epistemológico, consistência e uniformidade, são despidas de qualquer poder explicativo, não estão psicologicamente e cognitivamente interiorizadas? Ou, pelo contrário, constituem representações com fundamento epistemológico, têm um carácter sistemático, uma clara universalidade de características, algum poder explicativo, estão psicológica e cognitivamente interiorizadas? Ou será que existem concepções de um e de outro tipo?*

No primeiro caso tratar-se-á de **concepções erradas** que mais tarde ou mais cedo serão corrigidas e o problema cinge-se praticamente à sua detecção e rejeição.

No segundo caso, o problema será bem mais complexo. Trata-se de aquilo a que é preferível chamar-se **concepções alternativas**, não porque constituam, na grande maioria dos casos, alternativas possíveis às concepções consideradas científicas, mas porque constituem autênticos conhecimentos estruturados de modo diferente, que se traduzem em representações pelas quais os sujeitos, consciente ou inconscientemente, optaram.

Toda a reflexão epistemológica de que demos conta no capítulo anterior aponta no sentido de que as concepções da Ciência paradigmaticamente aceites não devem ser rotuladas de verdadeiras, mas antes de funcionais.

A inversa não é verdadeira, isto é, há concepções que a Ciência não aceita por se ter verificado serem rigorosamente falsas. Definido cientificamente um conceito, dentro de um quadro conceptual, o critério de falsificabilidade funciona de modo a poderem ser consideradas falsas determinadas afirmações. Assim, por exemplo, definido o conceito de fluxo magnético, é possível rotular de falsas concepções tais como a de que um fluxo magnético constante, num circuito fechado, produz neste uma corrente induzida. A experiência e a teoria mostram claramente que não.

Mas, toda a ideia divergente em Ciência e/ou no ensino da Ciência é como esta? Diz respeito a um pormenor, a uma situação particular muito bem conhecida e fácil de rebater lógica ou experimentalmente?

Se assim fosse, esta e muitas outras investigações em concepções consideradas cientificamente inaceitáveis teriam pouco interesse. Não passariam de um levantamento de erros que proliferam na Física e, principalmente, no seu ensino. Mas as coisas não se passam assim. A divergência conceptual diz muitas vezes respeito, como veremos, a ideias importantes que têm um carácter sistemático, possuem características universais, revelam uma estrutura consistente, constituem potenciais modelos explicativos podendo unificar vários fenómenos, resultam de um esforço de teorização baseado numa estrutura conceptual alternativa e de modo algum se confundem com interpretações momentâneas ou singulares, simples erros de cálculo ou distrações. A estas ideias divergentes, não hesitámos em chamar **concepções alternativas**, integrando-nos totalmente no paradigma

construtivista que lhe está subjacente (Cachapuz, 1995, p. 361, Pereira, 1995, p. 57).

Com base num estudo detalhado dos resultados da investigação de que tomámos conhecimento e em pesquisas por nós efectuadas, bem como na consulta de diversas obras, reunimos uma série de informações respeitantes às representações históricas que surgiram na construção da Física e às representações que os professores e alunos de Física possuem. A partir dessas informações, discutimos alguns problemas, tais como:

- *Se os alunos constroem representações alternativas dos fenómenos físicos, quais as características e origens destas representações? Terão algo que ver com a própria natureza do conhecimento científico?*
- *Se os professores também possuem concepções alternativas, elas serão muito distintas das dos alunos? Terão origens diferentes das deles ou, pelo contrário, terão origens análogas?*
- *Tem fundamento a existência, na própria Física, de concepções que se podem também classificar de alternativas? Caso afirmativo, essas concepções terão, quanto às suas características e origens, algumas semelhanças com as concepções alternativas dos alunos e dos professores?*
- *Se é um facto que a mudança conceptual pretendida ocorre tão dificilmente nos alunos (e só nos alunos?) quais as razões para tal?*
- *As discrepâncias conceptuais que encontramos em cientistas, professores e alunos sustentam os princípios epistemológicos anteriormente definidos, particularmente a tese de um isomorfismo entre a evolução do conhecimento científico nos seres humanos e na história?*

4. 2. *Concepções alternativas nos alunos de Física*

Entre as variáveis que a experiência de ensino mostra poderem contribuir para o sucesso da aprendizagem da Física, as mais debatidas e investigadas até aos anos 80 terão sido, talvez, as seguintes (Champagne et al., 1980): as *capacidades de manipulação matemática*; o *nível de desenvolvimento cognitivo do estudante*; os *processos cognitivos específicos*; os *pré-requisitos*. Um dos resultados que a investigação tem mostrado é que “*a capacidade matemática é só um dos muitos factores necessários para a Física, e uma alta nota num teste de matemática não é garantia do sucesso em Física*” (Hudson e McIntire, citados por Champagne et al., 1980, p. 1074).

Por que motivo tantos alunos, alguns com boas capacidades e conhecimentos de cálculo, claudicam na aprendizagem da Física?

Por volta dos anos 70, vários investigadores educacionais como Clement, Nussbaum e Novak, Leboutet-Barrel e Waern, baseando-se nas suas próprias pesquisas e na Psicologia educacional, postularam que **os estudantes desenvolvem concepções acerca do mundo físico que interferem fortemente com a sua aprendizagem**. Havia que reunir dados que sustentassem ou refutassem esta hipótese. De então para cá seguiu-se um amplo movimento que ficou conhecido como o **movimento das concepções alternativas**.

A época das concepções alternativas pode considerar-se iniciada ainda na década de 70, com as teses de doutoramento de Driver (1973) e Viennot (1979). Mas foi na última década que um amplo movimento de investigação educacional, em diversos países, permitiu recolher uma imensidão de dados.

Vamos, então, começar por fazer uma digressão histórica sobre a investigação em concepções alternativas dos alunos de Física, familiarizar-nos com os dados e as conclusões já obtidas, para depois discutirmos as características e origens dessas concepções, compará-las posteriormente com as características e origens das concepções alternativas dos professores e da própria Física, e tirarmos as nossas próprias conclusões acerca da natureza de umas e outras.

4.2.1 Concepções alternativas acerca da grandeza força

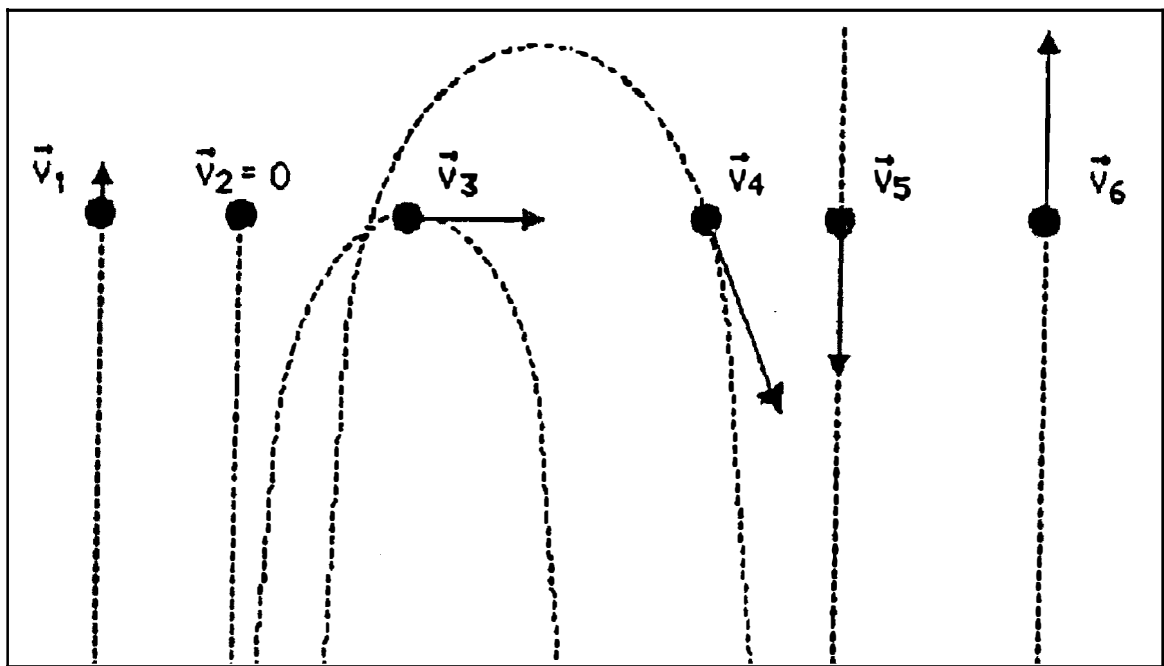
Já em 1990 havia para cima de 50 trabalhos de pesquisa sobre as concepções dos alunos acerca da grandeza força (Carmichael et al., 1990; Marín et al., 1994). Vamos referir-nos apenas aos trabalhos pioneiros e aos mais conhecidos.

1. A concepção alternativa «o movimento implica força» e as concepções com ela relacionadas.

Em 1979, **Viennot** publicou a sua tese de doutoramento, em Paris, subordinada ao título «*Le Raisonnement Spontané en Dynamique Élémentaire*», e escreveu um artigo sob o mesmo título, na revista de grande divulgação *European Journal of Science Education*. A investigação de Viennot centrava-se num trabalho feito com 311 alunos (29 do último ano da escola secundária, e os restantes universitários de diferentes países).

Uma das questões com que os estudantes foram confrontados é a seguinte:

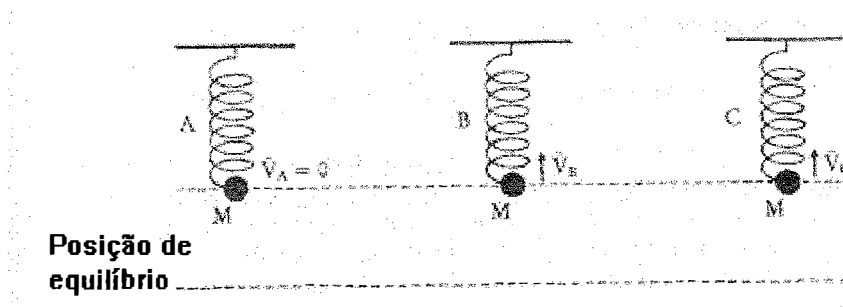
“Um malabarista manipula seis bolas idênticas. Num certo instante, as seis bolas estão no ar à mesma altura, seguindo as trajectórias mostradas na figura (também se mostram os vectores velocidade nesse instante). As forças que actuam nas bolas nesse instante são iguais ou diferentes? Justificar as respostas.”



O resultado foi o seguinte: *apenas 38% dos alunos do ensino secundário responderam que as bolas estavam actuadas por forças iguais*. Esta percentagem aumentou para aproximadamente 50 % *entre os alunos universitários*. A grande maioria dos alunos apresentava nítida tendência em associar a força à velocidade, insistindo na ideia de que se um corpo se move num dado sentido, a força está nesse sentido.

Outra das questões de Viennot foi, por exemplo, a seguinte:

“Três molas elásticas idênticas encontram-se suspensas do tecto por uma das suas extremidades. Da outra extremidade pende um corpo de massa M , igual nos três casos. As três molas oscilam relativamente à posição de equilíbrio, com diferentes amplitudes (considera-se desprezável o atrito). Num dado instante, quando o corpo de massa M da mola A alcança a sua posição de altura máxima (com velocidade $\vec{v}_A = 0$), os corpos de massa M das molas B e C estão a subir com velocidades diferentes, $\vec{v}_B$ e $\vec{v}_C$, como se mostra na figura.



Explicar se a força total que actua nos corpos é a mesma ou diferente”.

O resultado foi que *cerca de 50 % dos alunos responderam que as forças são diferentes*, sendo a justificação típica a seguinte: *“as forças são diferentes porque as velocidades são diferentes”*.

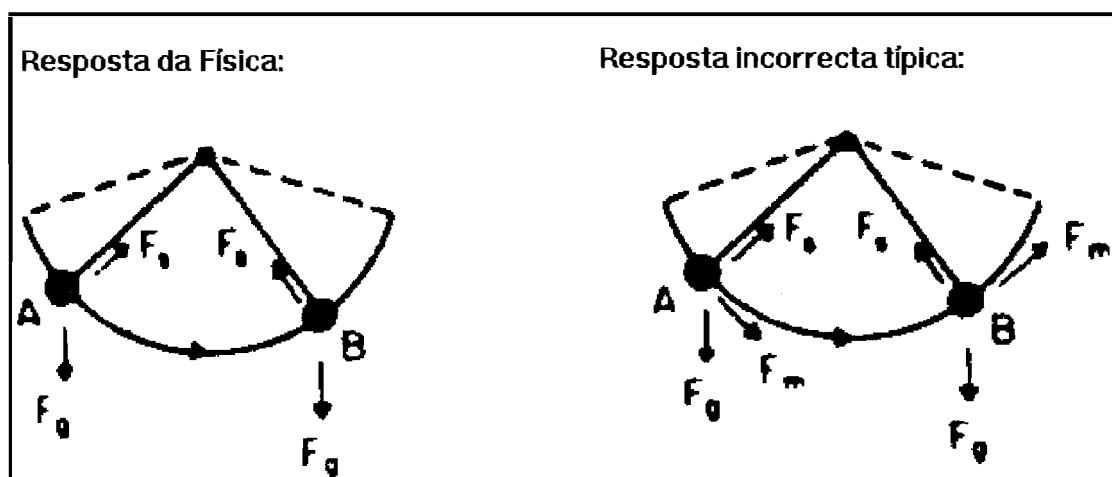
Com base na sua investigação, Viennot construiu um modelo para descrever o modo como os alunos pensam acerca da força. Segundo o *modelo de Viennot*:

- os estudantes utilizam geralmente a concepção newtoniana de força sempre que o movimento não lhes é directamente acessível, quer por experiência quer por diagramas; usam ainda a concepção newtoniana em situações experimentais em que a força tem a direcção e sentido do movimento ou o móvel permanece parado;
- utilizam a concepção não-newtoniana de força nas situações em que a força é oposta à velocidade, ou a velocidade é momentaneamente nula;
- a força não-newtoniana a que recorrem tem o sentido do movimento, sendo proporcional à velocidade (e não à aceleração, conforme determina a lei fundamental da Mecânica newtoniana) e não estando bem localizada no espaço e no tempo.

John Clement investigou a existência desta mesma concepção alternativa em alunos de um curso introdutório de Mecânica da Universidade de Massachusetts, colocando-lhes o seguinte problema (1982, pp. 66 a 71):

“(a) Um pêndulo oscila da esquerda para a direita, conforme se mostra na figura¹. Desenhar setas mostrando a direcção das forças que actuam na esfera do pêndulo no ponto A. Não representar a força resultante nem incluir forças de atrito.

(b) De modo semelhante, desenhar e rotular setas que mostrem a direcção das forças que actuam na esfera do pêndulo quando esta atinge a posição B.”

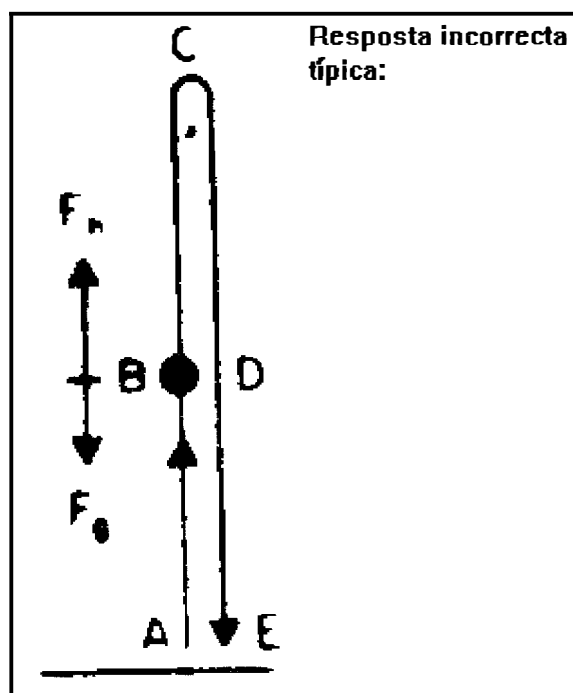


Uma explicação incorrecta que muitos alunos apresentaram foi a seguinte: “ $\vec{F}_m$ é a força que faz o pêndulo oscilar para cima. Se esta força $\vec{F}_m$ não existisse, o corpo pendular nunca poderia mover-se para a sua posição mais alta da oscilação.” (Ibidem, p. 67).

Uma outra questão colocada por Clement na mesma investigação, foi esta:

¹ A figura não é apresentada, mas é semelhante à que apresentamos nesta página, onde se compara a resposta correcta com a resposta incorrecta típica que os alunos apresentaram.

“Uma moeda é lançada verticalmente para cima do ponto A e cai no ponto E. No ponto à esquerda do desenho construir uma ou mais setas representando a força ou forças que actuam na moeda ao passar na posição B”.



Antes do curso de Mecânica, 88% dos estudantes deram uma resposta incorrecta, e, após terminarem o curso, a percentagem de respostas incorrectas ainda foi de 72%.

A resposta incorrecta típica foi a seguinte:

“Enquanto a moeda está a subir, a força da mão $\vec{F}_h$ empurra a moeda. Essa força deve ser maior do que a força gravítica, $\vec{F}_g$, de outro modo a moeda cairia”.

A existência desta concepção alternativa, a que Clement chamou a concepção «o movimento implica força», foi confirmada em alunos dos mais diversos países, incluindo Portugal (Watts e Zylbersztajn, 1981, Thomaz, 1983, Vasconcelos, 1985, Gunstone e Watts, 1989, Brown, 1989, Gamble, 1989, Sadanand e Kess, 1990, pp 530 a 533).

Duas concepções alternativas a ela ligadas, e que muitos alunos possuem, são as seguintes:

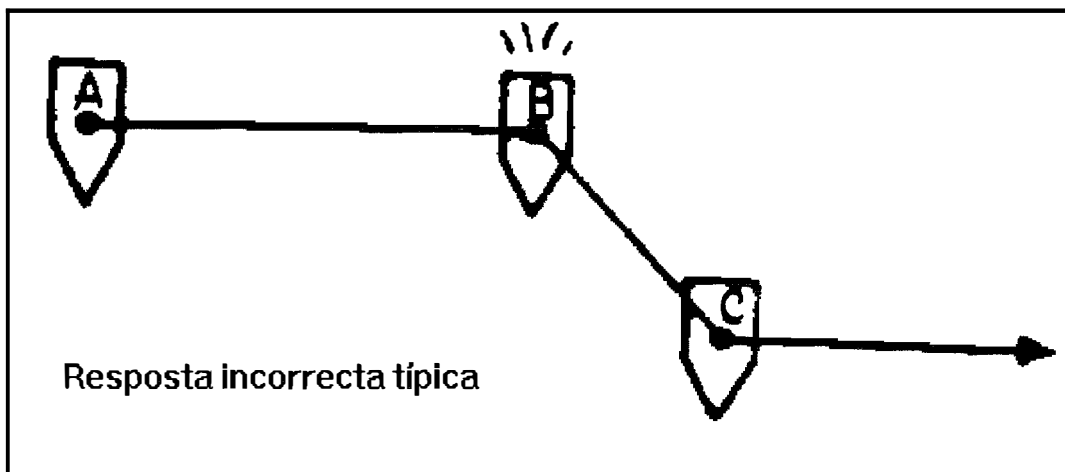
- *Um corpo com velocidade constante tem de estar actuado por uma força constante* (Watts e Zylbersztajn, 1981, Brown, 1989, Gamble, 1989).
- *Uma força cria movimento no sentido da força* (Gunstone e Watts, 1989).

Um outro problema que Clement colocou aos alunos - problema do foguetão - também confirmou esta última concepção alternativa. Esse problema baseou-se na seguinte situação (1982, p. 67):

Um foguetão move-se de lado no espaço, com os motores desligados, de A a B. Não está próximo de quaisquer planetas e não actuam quaisquer outras forças exteriores. No ponto B o seu motor de reacção é accionado durante 2 s enquanto o foguetão viaja do ponto B para um ponto C. Desenhar a forma da trajectória seguida pelo foguetão de B a C. Mostrar qual é a trajectória a partir do ponto C após o motor do foguetão ser desligado.

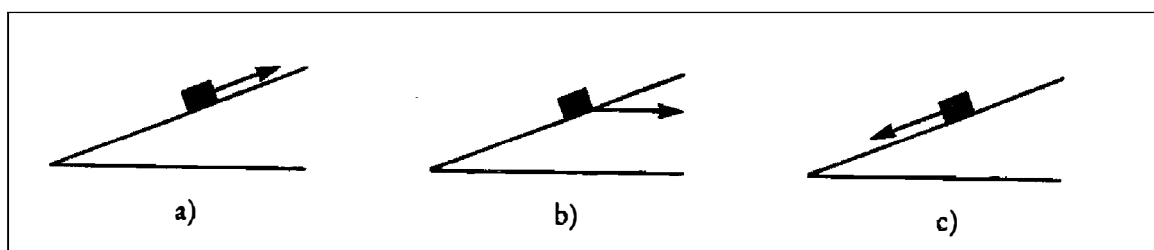
As percentagens de respostas correctas foram muito baixas. Para os estudantes mais habilitados (de Engenharia com dois semestres de Física) as percentagens de acerto foram 35% e 65% respectivamente para a primeira e para a segunda questão.

Muitos alunos representaram uma trajectória rectilínea entre B e C durante a actuação da força, uns representaram-na oblíqua e outros representaram-na mesmo perpendicular à trajectória primitiva. E muitos deles consideraram que, uma vez desligado o motor, o foguetão deveria seguir uma trajectória paralela à trajectória primitiva.



Os professores espanhóis Carrascosa e Gil (Gil et al., 1991, pp. 174-179) colocaram, em 1982, a seguinte questão a alunos do 2º ano e 3º ano do B.U.P.², do C.O.U.³, do 2º ano de um Curso Universitário de Química, e a professores em formação na Escola de Magistério:

“Um corpo é lançado para cima por um plano inclinado. Indicar qual dos três esquemas representa correctamente a força resultante que actua sobre esse corpo enquanto sobe?”



A tabela que se segue mostra os resultados obtidos:

² B.U.P. significa «Bachillerato Unificado Polivalente» e é equivalente aos nossos 10º e 11º anos de escolaridade.

³ C.O.U. significa «Curso de Orientación Universitaria » e equivale ao nosso 12º ano de escolaridade.

Grupo pesquisado	Tamanho da amostra	Percentagem de erro
2º ano do B.U.P.	196	70
3º ano do B.U.P.	213	61
C.O.U.	181	54
2º QUÍMICA	140	68
1º MAGISTÉRIO	145	71

(adaptado de Gil et al., 1991, p. 176)

Esses professores dirigem um grupo que tem efectuado uma extensa investigação no domínio das concepções alternativas. Uma das várias conclusões do seu trabalho foi que *86% de 241 alunos do C.O.U. não eram capazes de assinalar correctamente as forças que actuam num corpo lançado ao ar antes de alcançar a sua altura máxima*. E que o mesmo sucedia com *86 % de 65 professores em formação na Escola do Magistério*.

2. A concepção alternativa «as forças passivas não existem»

Até aqui privilegiámos as situações dinâmicas. Vamos agora analisar as concepções dos alunos sobre as forças em situações estáticas.

Foi em 1982 que Gilbert e seus colaboradores detectaram uma grande dificuldade dos alunos em se aperceberem da actuação de forças que não produzem movimento, como é o caso das forças de sustentação dos corpos apoiados em superfícies (Gilbert et al., 1982).

Esta dificuldade foi também verificada por Maloney (1984) e por Boyle e Maloney (1991).

As forças mais facilmente detectadas são as acções de contacto do tipo «puxão» ou «empurrão», mas tais forças são consideradas muitas vezes de naturezas diferentes (Gamble, 1989, Boyle e Maloney, 1991). As acções de suporte dos corpos não envolvem forças (Hierrezuelo e Montero, 1988).

Este não reconhecimento das “*forças passivas*” (McDermott, 1984, p. 24) foi comprovado em inúmeras investigações. Assim, por exemplo, em 1981, na Noruega, Svein Sjøberg e Svein Lie, da universidade de Oslo, administraram um questionário escrito a mais de 1000 estudantes de diversos níveis de ensino: estudantes dos três níveis do ensino secundário, do nível de graduação, do nível de pós-graduação em Física, e em formação inicial para futuros professores.

Numa das questões eram mostrados dois pêndulos, na posição intermédia de equilíbrio, um a oscilar e outro em repouso. Foi pedido aos estudantes para indicar as forças que actuavam no pêndulo nos dois casos.

Cerca de 40% dos estudantes do ensino secundário omitiram a força de tensão no pêndulo, o mesmo sucedendo com cerca de 40% dos estudantes em formação para professores e cerca de 10% dos estudantes graduados.

Além disso, um número substancial de alunos representaram uma força horizontal no corpo oscilante, precisamente no sentido em que este se move, mais uma confirmação da concepção «*movimento implica força*» (Idem, Ibidem).

Jim Minstrell (1982), na América, também detectou esta mesma dificuldade. Pediu a 25 estudantes da escola secundária para assinalar as forças que actuam num livro em repouso numa mesa. Todos eles assinalaram a força gravítica, mas apenas metade representou a força da mesa dirigida para cima.

Mais recentemente, Sadanand e Kess (1990, pp. 530 a 533) detectaram a mesma dificuldade num estudo feito com 57 estudantes de Física dos últimos anos da escola secundária, a quem aplicaram um teste de escolha múltipla. Do seu estudo concluíram que os estudantes possuíam as seguintes concepções alternativas (Ibidem, pp. 530):

- *Os corpos animados exercem forças para sustentar corpos, mas os corpos inanimados não as exercem.*
- *É necessária uma força constante para manter um movimento constante.*
- *As forças de reacção são menos reais do que as forças de acção.*

Concluíram, ainda, que mesmo os estudantes que têm sucesso no estudo da Física revelam uma falta de compreensão conceptual básica dessa ciência (Ibidem, p. 532).

Recentemente, uma equipa de investigadores de diversos países levou a efeito um estudo sobre concepções alternativas em Mecânica com alunos de 5 países africanos, o Zimbabwe, o Lesoto, a Botswana, a Suazilândia e Moçambique, e um país europeu, a Holanda (Kuiper et al., 1994, pp. 279 a 292). Encontraram em estudantes dos diversos países o mesmo tipo de ideias, ideias essas em tudo semelhantes às que temos vindo a referir. Assim, podemos resumir no seguinte quadro (adaptado de Kuiper et al., 1994, p. 284) as principais ideias encontradas entre os alunos que responderam às questões a que foram submetidos:

Ideias dos alunos	Corpos em repouso	Sistemas móveis	Lançamentos verticais	Interacções
Correctas	Actuam as forças gravítica e de reacção	Actua a força gravítica e a resistência do ar.	Actua a força gravítica e a resistência do ar	Actuam duas forças simétricas
Alternativas	1) Só actua a força gravítica. 2) Não actuam forças.	1) Actua uma força no sentido do movimento e em outros sentidos. 2) Actua uma força no sentido do movimento.	1) Actua uma força no sentido do movimento e a força gravítica. 2) Actua uma força no sentido do movimento.	1) Actuam duas forças desiguais. 2) Actua apenas uma força.

A tabela anterior separa dois níveis de respostas alternativas, que correspondem ao que os pesquisadores chamaram de respostas intermediárias e intuitivas. Discordamos destas designações, porque os alunos revelam ora umas ora outras dessas ideias alternativas, consoante o tipo de questões com que são confrontados e fazem-no de modo intuitivo e espontâneo.

As mesmas ideias acerca das interacções têm sido realçadas por muitos outros pesquisadores (Maloney, 1990, p. 386, Villani e Pacca, 1990, p. 595), considerando, por exemplo, mais intensa a força exercida pelo corpo maior sobre o corpo mais pequeno com que interage.

3. A concepção alternativa «a força de interacção depende da forma, da posição dos corpos e do facto de eles se moverem.»

Na análise de muitas situações de interacção entre corpos os alunos dão importância a factores figurativos (Marin et al., 1994, pp. 6 e 7) tais como a posição dos corpos.

Assim, por *exemplo*, é exigida mais força para sustentar um carro que está no cimo de uma montanha do que a meio da encosta, em condições idênticas (Watts e Zylbersztajn, 1981).

Outro *exemplo*: Quando dois corpos estão suspensos das extremidades de um fio que atravessa a gola de uma roldana fixa, muitos alunos admitem que não há equilíbrio a menos que os corpos estejam á mesma altura. O corpo que está mais baixo arrasta o outro tal como se tivesse um peso maior (Viennot, 1979).

Esta concepção alternativa tem como consequência uma enorme **dificuldade em utilizarem correctamente a lei da acção-reacção.**

Assim, por *exemplo*, admitem facilmente a acção atractiva que a Terra exerce num corpo, porque vêem o corpo mover-se para a Terra, mas têm muita dificuldade em idealizar uma força de igual intensidade a actuar na Terra, porque não vêem a Terra a mover-se ao encontro do corpo (Terry e Jones, 1986).

Na interacção entre uma pessoa forte e uma outra fisicamente débil, consideram (como já dissemos) que *a acção exercida pela pessoa forte é mais intensa do que a reacção exercida pela pessoa débil*.

Outro *exemplo*: a acção de um corpo pesado sobre um corpo leve colocado por baixo dele é maior do que a reacção do corpo de baixo sobre o de cima.

4. A concepção alternativa de que «a força é uma propriedade dos corpos que depende do contexto»

Brown (1989) descobriu, através de uma série de pesquisas, que os alunos consideram a força exercida por um corpo como uma propriedade do corpo que depende da condição deste. Por exemplo: quando duas bolas, uma em movimento e outra em repouso, colidem, a que se move exerce mais força do que a outra devido à sua condição.

Um outro exemplo bastante curioso: um ciclista exerce força numa bicicleta apenas quando pedala; quando deixa de pedalar, ainda que continue sentado na bicicleta, deixa de exercer qualquer força na bicicleta (Gilbert et al., 1989).

Em suma:

A análise dos múltiplos trabalhos de investigação sobre as ideias de alunos de diversas partes do mundo acerca do conceito de força permite-nos concluir que essas ideias se traduzem por *teorias pessoais alternativas* com concepções comuns a todos esses alunos.

Com base nos trabalhos que analisámos, podemos resumir essas concepções comuns do seguinte modo (Champagne et al., 1980, p. 1077, Clement, 1982, p. 69, Gilbert e Watts, 1983, Sadanand e Kess, 1990, p. 530):

(i) Se um corpo se move num dado sentido, é porque está actuado por uma força nesse sentido.

(ii) Sob a acção de uma força constante, um corpo move-se com velocidade constante.

(iii) O valor da velocidade de um corpo é proporcional à intensidade da força que o actua.

(iv) A aceleração de um corpo é devida a um aumento da força que o actua.

(v) Na ausência de força, um corpo, ou está em repouso, ou então, se está a mover-se acaba por parar.

(vi) O corpo move-se na ausência de força até parar porque armazenou uma espécie de “ímpeto” durante a actuação de uma força.

(vii) As forças que não produzem ou tendem a produzir movimentos no seu sentido não existem. É o caso da reacção de uma mesa sobre um corpo que não existe porque o corpo não se move para cima.

(viii) A acção que um corpo exerce noutro e a reacção que este exerce no primeiro dependem de aspectos figurativos tais como a forma e posição dos corpos, a massa dos mesmos, o seu tamanho, o estado cinético em que se encontram, etc.

(ix) A força é uma propriedade de um corpo.

Vimos como os alunos têm dificuldade em reconhecer a actuação de forças num corpo em repouso (Gilbert e Watts, 1983), mas a nossa experiência de professor tem-nos revelado que a dificuldade se refere apenas à força de reacção no suporte, que não à força gravítica que o «puxa para baixo». Esta é facilmente reconhecida porque a queda dos corpos é percebida no dia a dia (Finegold e Gorsky, 1991).

5. Concepções alternativas acerca do peso e da gravidade

Interrogámos os alunos de uma turma do 8º ano de escolaridade sobre o que era, para eles, o peso de um livro. A ideia típica que esses alunos revelaram possuir pode traduzir-se nas seguintes palavras de um deles: *«é uma característica que o livro tem que o puxa para baixo, se eu não agarrar o livro ele cai, é porque tem peso»*. A resposta dada por crianças de outros países antes da aprendizagem do conceito de peso seria certamente análoga, porque à partida os alunos têm, acerca do peso de um corpo, a ideia alternativa de que se trata de algo que o corpo possui que o puxa mais ou menos para a Terra (Reynoso et al., 1993, pp. 132 e 133).

Trata-se de uma noção primitiva em que o peso de um corpo é uma espécie de «qualidade oculta» que ele possui, ou seja: os alunos têm acerca do peso uma noção verdadeiramente peripatética, portanto afastada da noção evoluída que temos hoje.

Colocados perante a espantosa experiência da atracção magnética na bússola (experiência que muito impressionou Einstein em criança, segundo ele próprio algumas vezes recordou), e colocados perante a queda de um corpo, os alunos recorrem muitas vezes a uma analogia magnética para descrever a força da gravidade (Ibidem, p. 132).

Trabalhando com alunos mexicanos desde os 6-7 anos até aos 18-19 anos, Reynoso, Fierro, Torres, Missoni e Celis verificaram que poucos alunos, mesmo dos mais altos níveis, apresentaram uma boa definição de peso (Ibidem, pp. 127 e 132).

No que se refere à gravidade num astro, para muitos alunos ela tem algo que ver com a natureza do espaço que rodeia o astro. No caso da Terra tem que ver com a atmosfera, indo ao ponto de alguns alunos afirmarem que os objectos *«caem na*

Terra devido à existência de atmosfera» e «não caem na Lua porque lá não há atmosfera».

Reynoso et al. (1993) verificaram também que alguns alunos da faixa etária dos 10 a 12 anos acreditavam que *«os corpos flutuam na Lua porque lá não há gravidade».*

Outros alunos, estes da escola secundária, também concordavam que *«os corpos flutuam na Lua»*, mas justificaram tal facto de um modo mais formal, recorrendo a um «modelo de levitação», sendo esta produzida pela Terra: é que *«a força gravítica na Terra é maior do que na Lua!»* (Idem, Ibidem).

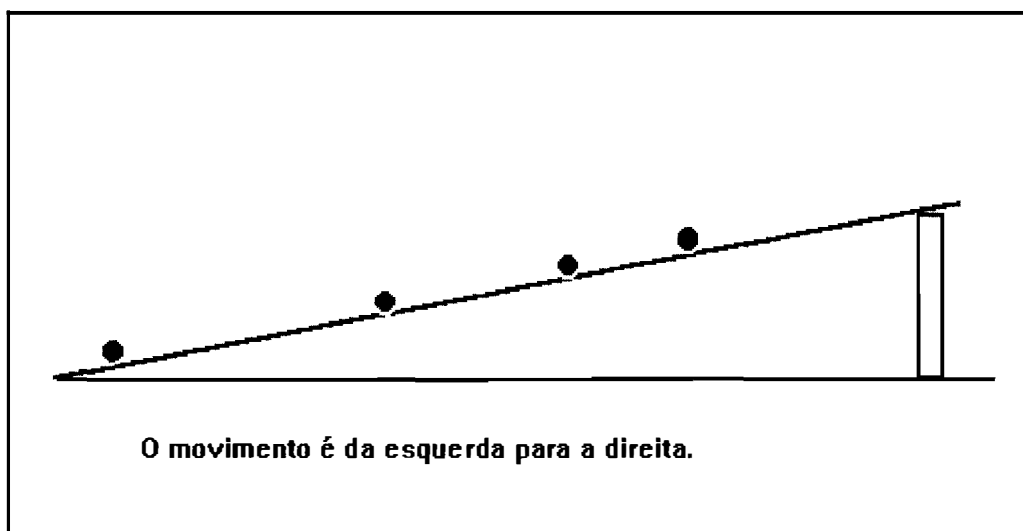
4.2.2 Concepções alternativas acerca dos movimentos

1. A concepção alternativa «igual posição implica igual rapidez»

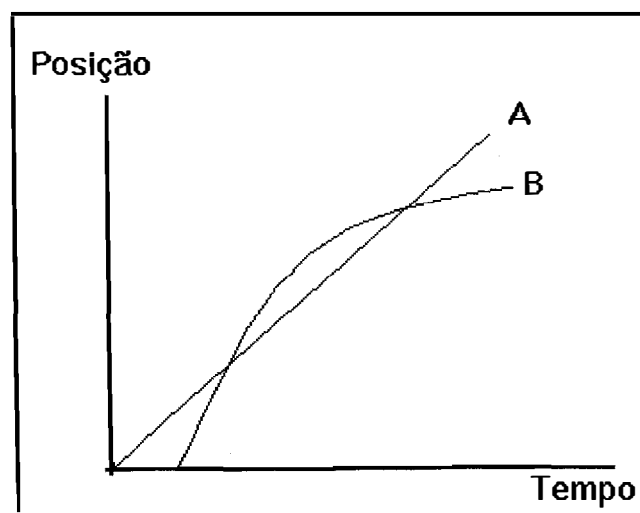
Um outro trabalho que conheceu assinalável êxito na área das concepções alternativas em Física teve a sua origem num grupo de trabalho da Universidade de Washington e foi divulgado pela revista *American Journal of Physics* (Trowbridge e McDermott, 1980, pp 1020 a 1028).

Esse trabalho centrou-se em mais de 300 entrevistas do tipo das de Piaget (conhecidas em Ciências de Educação por entrevistas «clínicas»).(1). A amostra era constituída por estudantes de diversos cursos introdutórios de Física da Universidade de Washington. O objectivo era aquilatar o seu grau de compreensão dos movimentos de duas esferas postas a rolar em calhas.

Numa dessas experiências, uma esfera, A, movia-se uniformemente numa calha horizontal e outra, B, subia com movimento retardado uma calha inclinada.



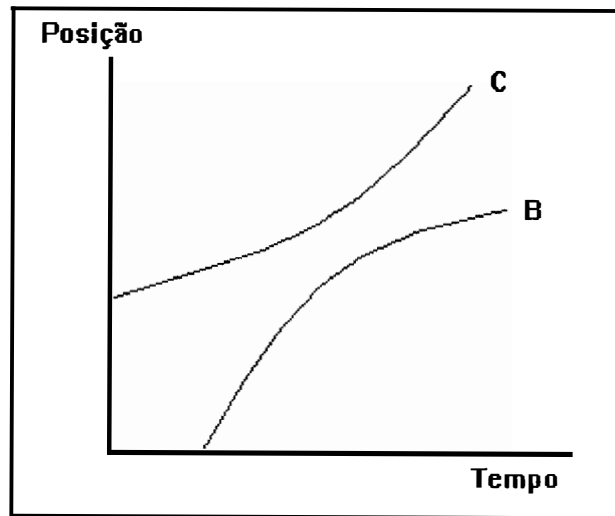
A esfera A era lançada ligeiramente antes da outra, de tal modo que as esferas, durante o seu movimento, estavam duas vezes a par, conforme se conclui do gráfico posição-tempo seguinte:



Trowbridge e McDermot verificaram que grande número de alunos se baseavam nas posições relativas para aquilatar acerca das velocidades das esferas. Com efeito, no momento em que uma das esferas, ao ultrapassar outra, estava a par com ela, os alunos afirmavam que elas tinham a mesma velocidade.

Noutra experiência, uma das esferas aumentava de velocidade ao descer um plano inclinado, e outra diminuía de velocidade ao subir outro plano inclinado colocado a par com o primeiro.

O gráfico posição-tempo referente ao movimento das duas esferas movendo-se em trajectórias paralelas é o seguinte:



Ainda que as duas esferas tivessem de possuir a determinado instante a mesma velocidade, os estudantes não reconheciam esse facto porque a esfera que descia o plano foi intencionalmente largada de uma posição à frente da outra e moveu-se sempre à frente da outra. Tínhamos assim a contra-prova da concepção alternativa «igual posição implica igual rapidez»: como as esferas nunca estavam a par, não possuíam nunca a mesma rapidez.

As duas conclusões importantes a tirar desta investigação de Trowbridge e McDermot são as seguintes (Ibidem, p. 1027):

1ª - “Os alunos usam a posição relativa para determinar a velocidade relativa dos corpos, numa clara confusão posição-velocidade.”

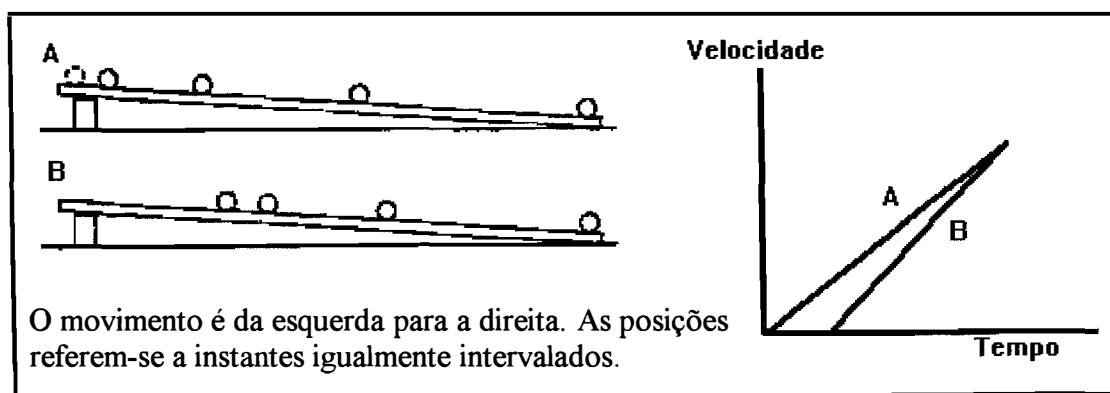
2ª - “Antes da instrução, o aluno possui tipicamente um reportório de procedimentos, vocabulário, associações e analogias para interpretar o movimento no mundo real”.

2. A concepção alternativa «posição determina a aceleração» e a confusão entre a velocidade e a aceleração

No seguimento da investigação acerca dos movimentos a uma dimensão, o grupo de Washington publicou, em 1981, um outro artigo versando, não já o conceito de velocidade, mas o de aceleração (Trowbridge e McDermott, 1981, pp. 242-253).

A tarefa dos estudantes universitários consistia agora em comparar as acelerações de duas esferas de aço, rolando em calhas de alumínio com a forma de U, igualmente inclinadas e colocadas paralelamente uma à outra.

As esferas eram largadas, sem velocidade inicial, de posições diferentes, nas calhas inclinadas, movendo-se portanto em distâncias diferentes. Como os sulcos tinham diferentes larguras, as acelerações das esferas eram diferentes. A experiência foi concebida de modo a que as esferas atingissem o fundo da calha com iguais velocidades e penetrassem, simultaneamente, em túneis lá colocados. Deste modo tornava-se nítida a igualdade de velocidade no fundo das rampas.



A que conclusão chegaram os investigadores? Muitos alunos afirmavam erradamente que as acelerações das esferas eram iguais, pois atingiam simultaneamente a mesma posição. Outros afirmavam que a esfera que seguia à frente devia ter, por esse facto, maior aceleração.

Um grande número de estudantes revelaram uma *confusão entre aceleração e velocidade*. Por exemplo, afirmavam que as esferas atingiam a mesma aceleração porque tinham a mesma velocidade no final.

As dificuldades com a aceleração e a velocidade também se manifestaram numa questão escrita em que foram consideradas duas esferas a descer planos com inclinações não necessariamente iguais e a mover-se depois horizontalmente com movimento uniforme. Eram dadas as distâncias e os tempos.

Muitos alunos aplicaram a equação $v = d/t$ ao movimento de descida, e usaram depois esta velocidade média como se fosse a velocidade instantânea no final, para o cálculo da aceleração pela fórmula $a = v/t$.

A respeito do movimento de subida do plano, havia uma grande tendência para considerar a aceleração nula no cume já que a velocidade do corpo móvel, nesse ponto, se reduzia instantaneamente a zero.

As conclusões tiradas pelos investigadores do grupo da Universidade de Washington acerca das deficiências dos estudantes podem ser resumidas do seguinte modo (McDermott, 1984, p. 27):

- *eles não associam uma dada velocidade instantânea com o instante correspondente;*
- *não discriminam entre velocidade e variação de velocidade;*
- *não entram em consideração com os intervalos de tempo em que as variações de velocidade têm lugar.*

Como consequência destas deficiências, os estudantes têm grande dificuldade em compreender o conceito de aceleração: definem formalmente a grandeza, mas depois não usam a definição (2).

3. Concepções alternativas acerca do movimento de queda dos corpos

Em 1978, Champagne, Klopfer e Anderson realizaram uma pesquisa com 110 alunos da Universidade de Pittsburgh, nos Estados Unidos, dos quais 62 % tinham tido um ou dois anos de Física no curso equivalente ao nosso secundário (1980, pp. 1074 a 1079).

A pesquisa centrou-se numa experiência com um movimento e sua observação e interpretação pelos alunos. Estes revelaram fraco domínio dos principais conceitos da Mecânica, a par com uma *“rica acumulação de ideias inter-relacionadas, constituindo um sistema pessoal de crenças acerca do movimento baseadas no senso comum”* (Ibidem, p. 1077).

Por exemplo, a propósito da queda dos graves ressaltou a existência das seguintes representações dos alunos:

- *Um corpo atinge instantaneamente uma velocidade máxima e, então, cai com velocidade constante.*
- *Os objectos mais pesados caem mais depressa do que os mais leves.* (Ibidem, p. 1076).

A existência destas ideias aristotélicas sobre a **queda dos graves** nos alunos foram confirmadas em muitos países. Por exemplo, em Espanha, Carrascosa e Gil realizaram em 1982 um estudo baseado nos dois problemas que se seguem:

1º Problema - *“Deixa-se cair um corpo de uma certa altura e demora 1 s a atingir o solo. Quanto levará um outro corpo de massa dupla a cair da mesma altura? Acrescentar os comentários julgados oportunos para justificar a resposta.”*

2º Problema - “*Lança-se verticalmente um objecto de baixo para cima com uma dada velocidade, atingindo a altura de 6 m. Que altura alcançará outro objecto lançado com a mesma velocidade, se a sua massa for metade da do primeiro?*”

As percentagens de alunos que responderam erradamente foram elevadas. Em relação aos alunos da Escola do Magistério, as *percentagens de respostas erradas* foram de 66% e 68%, respectivamente à 1ª e à 2ª questão. E os *alunos universitários* tiveram percentagens de *insucesso* de 39% e 44%, respectivamente (Gil et al., 1991, p. 180).

Muitas outras pesquisas têm também revelado que os alunos possuem ideias aristotélicas e não galilaicas acerca da queda dos graves. Porquê? Na secção dedicada à origem das concepções alternativas procuraremos apresentar a justificação para estas e as outras concepções alternativas. Podemos, porém, realçar desde já o facto de as ideias aristotélicas acerca da queda dos graves serem muito mais intuitivas e indutíveis da experiência do dia a dia do que as ideias de Galileu acerca do dito movimento.

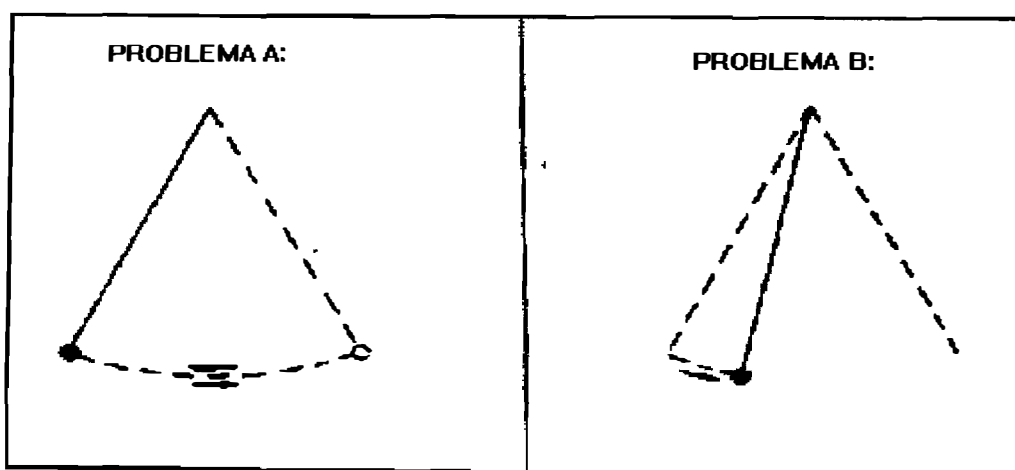
Com efeito, todos os dias vemos objectos a cair mais devagar do que outros e sem aumentarem a sua velocidade. E isto porque vivemos numa Terra onde existe uma atmosfera que nós não vemos, mas que interfere de modo significativo com os corpos em queda.

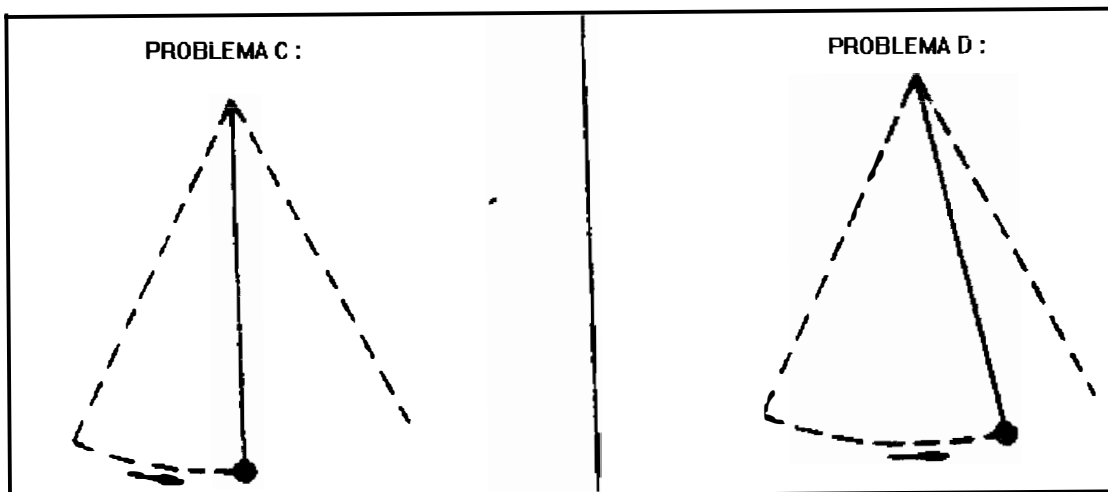
Como sabemos, o ar exerce sobre os corpos em queda uma força resistente que se opõe ao movimento de queda, tornando este movimento mais consentâneo com as ideias aristotélicas do que com as ideias galilaicas. Estas resultam de uma *abstracção reflexiva* que está muito para além da experiência primeira.

4. Concepções alternativas acerca do movimento dos projecteis.

Um grupo de investigação do departamento de Psicologia da Universidade de Johns Hopkins, constituído por McCloskey, Caramazza e Green, desenvolveu uma pesquisa centrada no **movimento dos projecteis** com 44 estudantes universitários. Desses estudantes, 10 tinham completado pelo menos um curso de Física a nível do «College», 20 tinham tido a disciplina de Física a nível do nosso ensino secundário, e 14 não tinham tido frequência de qualquer curso de Física a nível secundário ou superior (Caramazza et al., 1981, pp. 117 a 123).

Foram apresentados quatro problemas aos estudantes e, em cada um deles, era-lhes pedido que desenhassem a trajectória que a bola de um pêndulo gravítico deveria seguir se o fio do pêndulo fosse cortado numa dada posição. Estas posições diferiam de problema para problema conforme se indica nas figuras seguintes. Os sentidos dos movimentos das bolas no momento dos cortes também foram indicados nos problemas.





O resultado foi que *apenas 25 % dos 44 estudantes revelaram uma compreensão básica do movimento dos projecteis* (Ibidem, p. 118).

Com efeito, apenas 11 estudantes apresentaram o padrão de respostas da primeira linha da figura da página seguinte, que é o correcto.

Os restantes estudantes revelaram deficiências. Os tipos e as percentagens de respostas deficientes constam das linhas 2 a 6 da mesma figura.

Por exemplo, 32 % dos alunos consideraram que o corpo, ao ser cortado o fio no momento de atingir a extremidade, ainda continua a mover-se mais um pouco. Em compensação, ao cortar-se o fio na passagem do corpo pela posição de equilíbrio, o corpo cai imediatamente na vertical.

Como na extremidade a velocidade se anula e no meio da trajectória não, o que sucede é exactamente o oposto do que eles pensam.

Que raciocínio estará na base destas previsões desses alunos?

Pensamos que subjacente a estas respostas, está um raciocínio espontâneo que tem que ver com o modo como vêm cair os corpos no dia a dia. Tudo se passa como se houvesse uma força interna, uma espécie de ímpeto, que se mantém na extremidade mas que desaparece no meio.

TIPO 1:

25 %



TIPO 2:

32 %



TIPO 3:

14 %



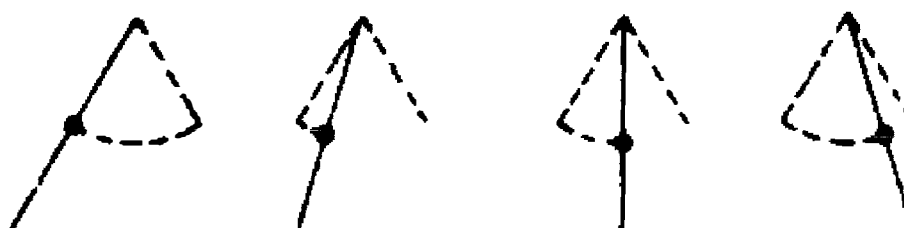
TIPO 4:

7 %



TIPO 5:

11 %



TIPO 6:

11 %



McCloskey, um dos investigadores atrás referidos da Universidade de Johns Hopkins, realizou uma outra pesquisa com estudantes universitários. Foi pedido a estes que caminhassem ao longo de uma sala e que, a andar, deixassem cair uma bola de golfe de modo a bater num pequeno círculo desenhado no chão. O resultado foi que *80% dos estudantes largaram a bola quando ela estava exactamente por cima do alvo*, acreditando que ela cairia verticalmente. Esta percentagem *baixou para 27% após terem frequentado um curso de Física* (McCloskey, 1983, p. 114).

As conclusões a que os investigadores da Universidade Johns Hopkins chegaram são, em resumo, as seguintes (Caramazza et al., 1981, pp. 121 e 122; McCloskey, 1983, pp 114, 115 e 116):

- *A experiência que os alunos possuem acerca do movimento dos projecteis no mundo real não os conduz à abstracção de ideias consistentes com as leis formais do movimento.*
- *As respostas dos estudantes não são aleatórias, revelando-se, pelo contrário, alguns padrões de respostas bem delineados.*
- *Alguns alunos têm uma representação em tudo semelhante à representação que, na história da Ciência, ficou conhecida como a teoria do ímpeto.*

5. Concepções absolutas pré-galilaicas acerca da relatividade do movimento

Os alunos têm tendência para privilegiar as descrições absolutas, geocêntricas e antropomórficas dos movimentos. Por exemplo, dados dois observadores, um espacial e outro terrestre, e solicitados a analisar o movimento do ponto de vista do observador espacial, acabam por raciocinar segundo o ponto de vista do observador terrestre.

Mesmo alunos que já estudaram a Teoria da Relatividade Restrita também continuam a privilegiar os referenciais terrestres. O antropomorfismo inerente à sua condição de seres terrestres influencia o seu raciocínio.

No que se refere à resolução dos problemas de relatividade do movimento com que são confrontados, o facto de não aplicarem os conceitos da Teoria da Relatividade de Einstein para os resolver nem é de espantar, porque essa teoria não lhes é familiar, não lidam com ela na vida do dia a dia. O que é de realçar e não deixa de ser bastante significativo é o facto de, muitas vezes, nem sequer utilizarem correctamente o quadro conceptual da Relatividade de Galileu, caindo em concepções espontâneas de carácter absoluto e pré-galilaico.

Assim, por exemplo, face ao movimento de um corpo de trás para a frente ao longo de uma nave espacial que passa sobre a Terra, consideram a distância percorrida num certo tempo igual para o observador da nave e para o observador terrestre. Ora, isto é contrário ao próprio modelo relativista galilaico onde a velocidade, sendo relativa, implica uma distância percorrida relativa. E, quando confrontados com as equações da Teoria da Relatividade, e com a conclusão que as distâncias são diferentes, os alunos têm tendência a considerar unicamente como real e verdadeira a distância que o observador terrestre mede. A distância medida pelo observador da nave é considerada aparente, é encarada como consequência de um movimento aparente, entendido como uma ilusão óptica (Villani e Pacca, 1990, p. 589-600).

No que se refere às representações cinemáticas, Edith Saltiel e J. L. Malgrange, da Universidade de Paris, registaram a existência de concepções pré-galilaicas em crianças de 11 anos de idade e a sua persistência em alunos universitários (Saltiel e Malgrange, 1980). Notaram, por exemplo, que a velocidade é encarada como uma propriedade intrínseca de um objecto, absolutamente independente de qualquer referencial. E que o mesmo sucede quanto à distância percorrida pelos corpos. Ora estas duas grandezas são grandezas eminentemente relativas, mesmo na Física newtoniana.

Algumas das características do *modelo espontâneo* que é usado pelos alunos como referencial alternativo, e que Saltiel e Malgrange registaram, são as seguintes:

- *a velocidade de um móvel, a distância que ele percorre e a trajectória que descreve são tidas como independentes do referencial;*
- *o movimento é explicado, em termos causais, por meio da associação de algo que o ocasiona (funciona como «motor») e que possui a velocidade real observável para o objecto móvel;*
- *o movimento é relacionado com um espaço absoluto onde há apenas uma velocidade verdadeira, e uma distância percorrida verdadeira; qualquer diferença nas medições da velocidade e da distância percorrida notada por observadores móveis entre si é encarada como consequência de um movimento «aparente», entendido como uma ilusão óptica;*
- *nas situações com movimentos de transporte não é usada a transformação de coordenadas de Galileu (e muito menos a de Lorentz) para o movimento relativo; é usada a adição de movimentos absolutos, em que as velocidades e as distâncias são encaradas como somas de velocidades e distâncias «próprias» percorridas pelo objecto móvel e o seu «motor».*

No Brasil, os investigadores Alberto Villani e Jesuina Pacca efectuaram uma pesquisa com estudantes de Física envolvidos em cursos de pós-graduação, e detectaram que neles persistem concepções espontâneas idênticas às manifestadas pelos estudantes do ensino secundário, as quais apresentam as características registadas por Saltiel e Malgrange (Villani e Pacca, 1987, pp. 55 a 66).

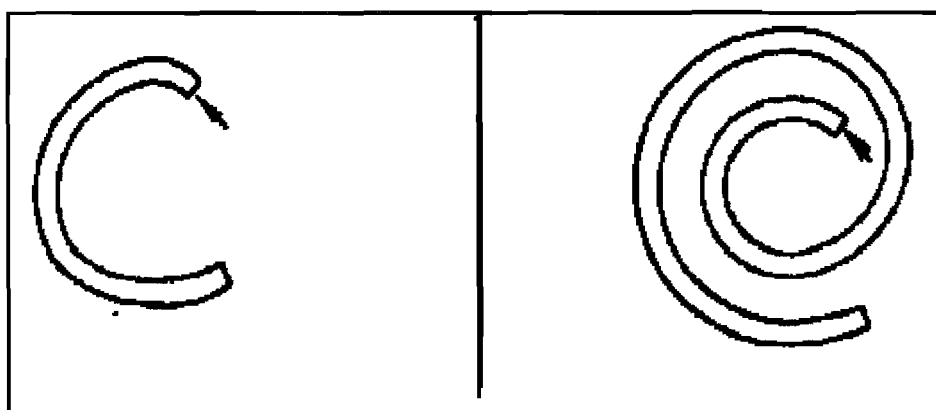
4.2.3 Concepções alternativas acerca da inércia e da massa dos corpos

1. A concepção alternativa «inércia no movimento circular»

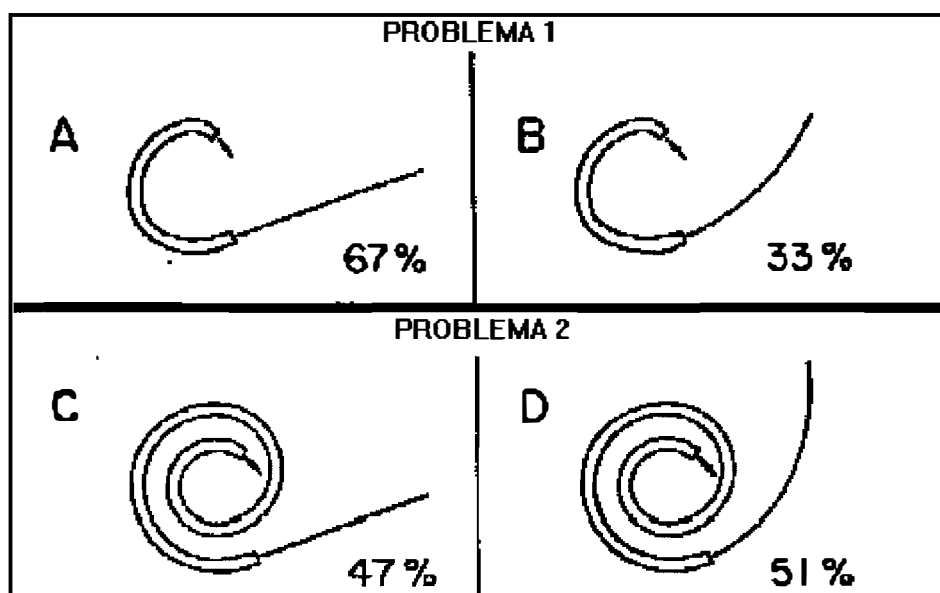
Em 1980, o grupo de investigação do Departamento de Psicologia da Universidade Johns Hopkins, a que atrás nos referimos (4.2.2.4), publicou na revista *Science* os resultados de uma investigação que efectuou acerca da compreensão do movimento circular (McCloskey et al., 1980, pp. 1139-1141).

A investigação foi efectuada com 47 estudantes, 15 dos quais só tinham estudado Física a nível elementar, 22 tinham estudado Física a nível do ensino secundário, e 10 tinham completado pelo menos um curso de Física a nível do «College». Esses estudantes foram submetidos a um teste constituído por treze problemas simples.

Em quatro desses problemas foi pedido aos estudantes que desenhassem as trajetórias que deveriam ter esferas a mover-se em tubos curvos, após a sua saída dos tubos. Os dois primeiros problemas diziam respeito às situações seguintes:



As respostas dos alunos a esses dois primeiros problemas estão traduzidas na figura que se segue:



Como vemos, muitos alunos revelaram a concepção de que um corpo, ao mover-se num tubo curvo, continua a mover-se curvilineamente ao abandonar o tubo, quando nenhuma força resultante actua no corpo. Esses alunos possuem a ideia de uma «**inércia circular**» dos corpos. Também é significativo o facto de, ao aumentar o número de voltas do tubo, mais alunos acreditarem que a esfera mantém um movimento curvilíneo depois de sair do tubo. A «inércia circular» é, para os alunos, uma espécie de «ímpeto» que vai sendo adquirido à medida que o corpo curva. Esse ímpeto mantém-se depois no corpo, obrigando-o a curvar.

2. Concepções alternativas acerca da massa

É sobejamente conhecida a confusão que os alunos fazem entre massa e peso. Essa confusão é uma herança cultural, pois no dia a dia essas grandezas confundem-se. Quando numa loja compramos «um quilo» de arroz, o vendedor não distingue entre a massa do arroz e o seu peso. Refere-se à quantidade de arroz, ou seja ao conceito newtoniano de massa, garantindo que «o peso do arroz está correcto».

Ainda que os livros tenham sempre uma secção dedicada à diferença entre peso e massa, esta é muitas vezes encarada pelos alunos como uma designação académica para aquilo que na prática se chama peso. A experiência de ensino desses conceitos permite-nos afirmar que essa confusão entre massa e peso persistia nos alunos durante mais tempo na época em que não se utilizava o Sistema Internacional de Unidades, e quando, em simultâneo, se falava no peso em quilogramas-força e na massa em quilogramas.

A situação melhorou consideravelmente com o uso sistemático, nas escolas, do Sistema Internacional de Unidades, e a fuga ao uso do quilograma-força (chamado vulgarmente quilograma) como unidade de força. Mas a situação, no que se refere à linguagem vulgar não se modificou, e a influência da linguagem diária mantém-se. Não admira, pois, a dificuldade inicial dos alunos acerca do conceito de massa. E durante e após o ensino da Física? A massa torna-se um conceito univocamente bem definido na estrutura cognitiva dos alunos? A experiência que possuímos e os resultados de pesquisa que conhecemos levam-nos a afirmar que não.

Acontece que a mesma palavra, «massa», adquire significados diferentes em vários contextos diferentes (mesmo sem sair do domínio da Mecânica Clássica).

Assim, a massa surge num dado contexto associado à noção de corpo, noutro contexto associado à inércia, e ainda num outro associado ao campo gravítico. O conceito diferencia-se de modo diverso nesses diferentes contextos, não admirando, pois, que os alunos acabem por utilizar noções de massa distintas:

CONTEXTO REPRESENTAÇÃO	Corpóreo	Gravitacional	Inercial
Ontológica	OM	-	-
Funcional	-	FG	FI
Translacional	TM	TG	-
Relacional	RM	RG	RI
Operacional	-	OG	OI

(tabela adaptada de Doménech, Casasús e Doménech, 1993, p. 170)

Estas noções de massa integram-se num esquema proposto por Gorodetsky, Hoz e Vinner (1986) para as representações das grandezas físicas. De acordo com este esquema, as representações dessas grandezas podem, a nível semântico, repartir-se em 5 categorias:

- as **representações ontológicas ou metafísicas** que são mais ou menos vagas e obscuras, por falta de referentes matemáticos; exemplos: a definição de massa como corpo, ou como quantidade de matéria; a de energia como acção ou actividade; etc;
- as **representações funcionais**, em que a grandeza surge contextualizada como função qualitativa de propriedades particulares, tendências ou comportamentos de um sistema; um exemplo: a definição de energia como capacidade de realizar trabalho;
- as **representações translacionais**, em que a grandeza é definida por associação qualitativa ou mesmo identificação a outras grandezas que se consideram previamente definidas; um exemplo: a noção de peso como gravidade; a de massa como peso; etc;
- as **representações relacionais**, em que a grandeza é definida por meio de uma relação matemática; um exemplo: a definição de força através da derivada do momento linear em ordem ao tempo; a de massa pelo quociente da força pela aceleração; etc.
- as **representações operacionais**, em que a grandeza é concretizada através de operações experimentais concretas e bem definidas; um exemplo: a temperatura é a grandeza determinada através de um termómetro; a força é a grandeza lida num dinamómetro; a definição de Mach de massa; etc.

Com base neste esquema, as diversas noções de massa que Doménech et al. (1993, pp. 163 a 173) distinguiram nos alunos podem concretizar-se do seguinte modo:

- **Noção OM** - É uma noção ontológica; tem que ver com os conceitos de corpo, matéria ou partícula e identifica-se com ele. A conhecida definição newtoniana de massa como *quantidade de matéria* fica aqui englobada.
- **Noção FI** - É uma noção funcional; a massa surge como algo que um corpo possui que se identifica mais ou menos com o que em Física se chama *inércia*.
- **Noção FG** - Também é uma noção funcional; a massa surge como algo que um corpo possui, que lhe confere a tendência para descer na atmosfera e a que podemos chamar *ponderabilidade*.
- **Noção TG** - É uma noção translacional em que a massa se identifica com *peso*.
- **Noção TM** - É uma noção translacional em que a massa é identificada com *densidade* ou com *extensão*.
- **Noção RI** - É uma noção relacional; a massa é definida como o quociente entre a força e a aceleração, algo que um corpo possui que se identifica mais ou menos com o que em Física se chama massa *inercial*.
- **Noção RG** - É uma noção relacional em que a massa é definida como quociente da força gravítica a que os alunos associam a palavra peso e a intensidade do campo gravítico que os alunos não distinguem da aceleração da gravidade por serem numericamente iguais no mesmo ponto.
- **Noção OG** - É uma noção operacional; a massa surge como a grandeza medida com a balança.
- **Noção OI** - É uma noção operacional; a massa de um corpo é definida com base num processo envolvendo a aplicação de uma força no corpo, a medida da aceleração e a determinação do quociente entre a força e a aceleração. A conhecida noção de Mach baseada nas interacções também cabe neste grupo.

Na Física Clássica, estas noções são *experimentalmente* equivalentes. Com efeito, a equivalência entre a massa gravitacional e a massa inercial foi demonstrada experimentalmente por Dicke com uma precisão de 10^{-11} (3). Não se trata de uma equivalência fundamental, mas tão só factual. Conceptualmente, as diversas massas são distintas, e os alunos, inconscientemente, utilizam os diversos conceitos de massa.

Doménech et al.(1993, pp. 163 a 173) pesquisaram a existência destas noções em 92 alunos de duas escolas secundárias espanholas, de vários níveis do ensino secundário. As questões estruturadas que utilizaram foram as seguintes:

“Q₁ Leia, por favor, cada questão completamente e explique em breves palavras o seu pensamento acerca da mesma.

- 1. Como define massa? Descreva uma definição científica de massa.*
- 2. Como mediria a massa de: (a) uma moeda? (b) um barco? (c) um grão de arroz?*
- 3. Como mediria a massa de uma moeda na Lua? Como a mediria num foguetão sem gravidade?*
- 4. O que pensa acerca da diferença entre o movimento de um homem-foguete na Terra e na Lua?*
- 5. Descreva o que pensa ser a diferença entre massa e peso.*

Utilizaram também um subteste de questões de escolha múltipla, do qual se transcreve apenas o início:

Q₂ Leia, por favor, cada questão completamente e assinale a afirmação que considerar a melhor interpretação.

- 1. A massa pode ser definida como:*
 - (a) O peso de um corpo.*
 - (b) A quantidade de matéria de um corpo.*
 - (c) o volume de um corpo.*
 - (d) A resistência de um corpo à aceleração.”*

Resumimos, a seguir, as principais conclusões do estudo de Doménech et al. (1993, pp. 169 a 173):

1ª - Nas respostas à primeira questão predominaram as noções OM, TM e TG. Poucos alunos recorreram a noções inerciais.

2ª - Houve uma grande proporção de alunos que mudaram a definição apresentada na primeira questão para a definição OM.

3ª - Essa noção OM foi de longe a mais preferida pelos alunos do nível mais elevado, com maior formação em Física.

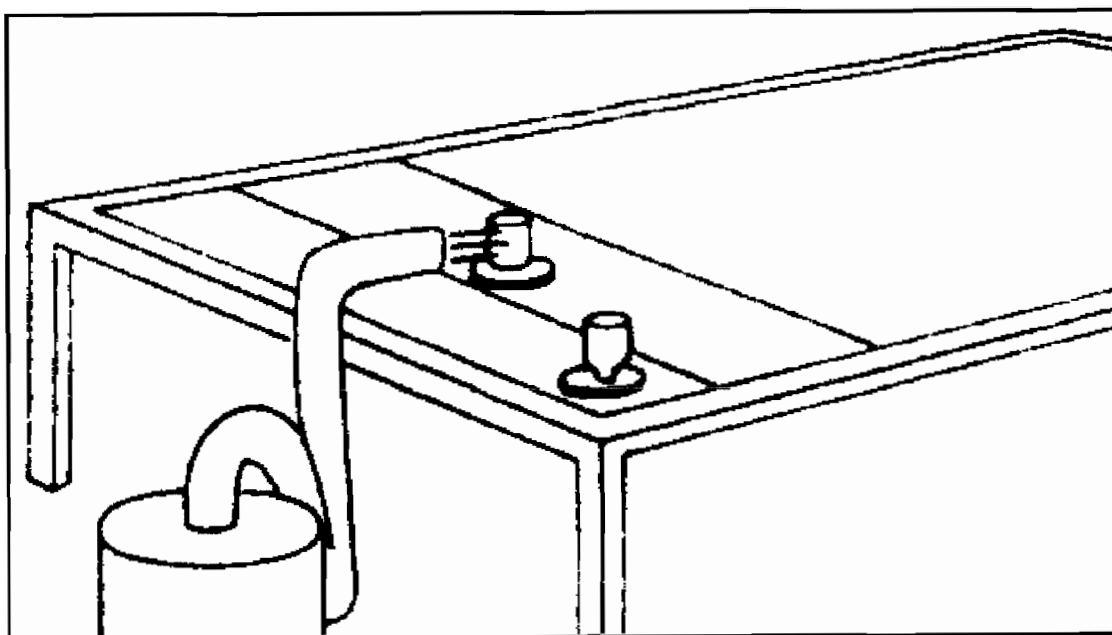
4ª - O estudo apontou para a confirmação do princípio segundo o qual os referenciais conceptuais dos estudantes são condicionados pelas experiências físicas e linguísticas prévias (Driver e Erikson, 1983, Hewson, 1986).

3. Concepção alternativa «maior massa implica menor velocidade»

Ronald **Lawson** e Lillian **McDermott** (1987, pp. 811 a 817) investigaram a compreensão dos estudantes acerca das leis físicas do *trabalho-energia* e do *impulso-momento*. Utilizaram dois discos de gelo seco a moverem-se numa mesa de vidro onde existiam duas linhas paralelas. Um dos discos era feito de um material muito mais denso e tinha, por isso, muito mais massa do que o outro.

Por meio de um jacto de ar aplicavam a mesma força a ambos os discos. Iniciavam a aplicação do jacto quando cada disco repousava sobre uma das linhas e suspendiam a aplicação do jacto quando o disco atingia a outra linha.

Perguntavam, então, aos estudantes se a energia cinética e o momento linear dos discos eram iguais ou diferentes ao atingirem a segunda linha.



Como o trabalho aplicado nos dois discos era o mesmo, a energia cinética dos discos era igual no fim. Porém, como o disco mais pesado se movia mais lentamente, o tempo de aplicação da força nele era maior. O impulso nesse disco mais pesado era maior, e, conseqüentemente, o momento linear também era maior.

Apenas cerca de metade dos melhores estudantes fizeram a correcta associação entre as expressões matemáticas que conheciam e a demonstração experimental efectuada. Muitos responderam, por exemplo, que os discos deviam ter o mesmo momento linear.

O modelo de justificação que apresentaram foi este: *«o momento linear é o produto da massa pela velocidade. A força é a mesma, logo o que tem maior massa adquire menor velocidade. Então o produto da massa pela velocidade é constante»*.

A pesquisa efectuada por Lawson e McDermott permitiu-lhes concluir o seguinte:

- *Ainda que aplicando facilmente as relações matemáticas $I = \Delta p$ e $W = \Delta E_c$ a problemas estereotipados dos livros de texto, os alunos revelavam grande dificuldade em aplicar as mesmas expressões nas situações experimentais.*

- *Os alunos tinham tendência em desvirtuar a lei fundamental de Newton ao confundirem a aceleração com a velocidade: para a mesma força, maior massa implica menor velocidade e vice-versa.*

4.2.4 Concepções alternativas acerca da energia

Há cerca de dez anos que as concepções dos alunos sobre a energia têm vindo a ser investigadas em vários países. Essas concepções têm revelado um padrão tão uniforme que é hoje possível falar-se com toda a propriedade de concepções alternativas dos alunos sobre energia, sem termos em conta o país, a língua, a idade, a escola e os mais diversos factores relativos aos alunos.

Os problemas que as concepções alternativas sobre energia levantam ao ensino da Física têm vindo a ser debatidos desde que a revista *European Journal of Science Education* (actual *International Journal of Science Education*) publicou uma série de artigos sobre esse tema (Sextl, 1981; Duit 1981; Warren, 1982; Solomon, 1983).

Já em 1983, Watts fez uma síntese das principais concepções dos estudantes sobre a energia, tendo catalogado *sete referenciais alternativos*. De então para cá, muitos estudos têm sido levados a cabo em diversos países (Duit 1984; Bliss e Ogborn, 1985; Gilbert e Pope, 1986; Cachapuz e Martins, 1987; Trumper, 1990; Valente e Pereira, 1990; Favieres et al., 1991, etc.) sempre com resultados muito uniformes.

No quadro da página seguinte, resumimos as sete principais concepções alternativas dos alunos acerca da energia, identificando cada uma delas (na 1ª coluna), indicando os trabalhos pioneiros acerca dessa particular concepção (segundo o nosso conhecimento, salvaguardando desde já a hipótese de haver um ou outro trabalho de que não tenhamos tomado conhecimento), e fazendo um breve comentário acerca de cada concepção (na 3ª coluna).

Concepção alternativa	Trabalhos pioneiros	Breve comentário
Energia como força.	Duit (1981) na Alemanha; Watts e Gilbert (1983) e Brooks e Driver (1984) em Inglaterra.	Concepção que muitos cientistas possuíam até quase ao final do século passado.
Visão antropomórfica da energia.	Stead (1980) na Nova Zelândia; Black e Solomon (1983) em Inglaterra.	A energia é associada aos objectos animados, e em particular ao homem.
Energia como causa do movimento.	Stead (1980) na Nova Zelândia	Os alunos não têm a intuição de que um corpo se move sem necessidade de receber energia.
Energia como combustível.	Stead (1980) na Nova Zelândia; Duit (1981) na Alemanha; Watts (1983) em Inglaterra.	Stead chamou logo a atenção para o efeito indutor de expressões como «crise de energia», «poupança de energia», etc.
Energia como fluido.	Duit (1981) na Alemanha; Watts (1983) em Inglaterra.	O facto dos alunos verem explorar a energia do vento, dos caudais de água, da corrente eléctrica, leva-os à substantificação da energia, confundindo esta grandeza com a própria água, com o ar, ou com a corrente eléctrica.
A energia como reagente ou produto da reacção.	Cachapuz e Martins (1987), em Portugal.	O facto de muitas reacções, para se desencadearem, exigirem um pequeno fornecimento de energia (energia de activação) para levar os reagentes à forma de complexo activado, leva os alunos a pensar que a energia é uma espécie de reagente.
Energia como causa das coisas sucederem, “ <i>the go of things</i> ” (Ogborn, 1986, pág. 30).	Ogborn, (1986) e Ogborn (1990) em Inglaterra.	Esta ideia causal, histórica e tão vulgar, é transmitida culturalmente aos alunos, e muitas vezes reforçada na escola.

Numa pesquisa que efectuámos, no âmbito deste trabalho, com os alunos de duas turmas de elevado rendimento escolar, uma do 8º ano e outra do 11º ano de escolaridade, tivemos oportunidade de confirmar a presença de concepções alternativas que constam no quadro anterior em todos os estudantes do 8º ano e em alguns do 11º ano (Valadares, 1994).

A análise das concepções alternativas sobre energia confirma a *importância da linguagem* como potencial factor desencadeador desse tipo de concepções. Apesar de nos referirmos mais adiante à importância da linguagem, gostaríamos de adiantar já um exemplo:

Dizer que uma partícula se move espontaneamente de uma posição mais alta, onde a energia potencial é maior, para outra mais baixa, onde a energia potencial é menor, leva muitos alunos a inferirem incorrectamente que a energia é a causa desse movimento espontâneo (Gailiunas, 1988, p. 588).

Esta concepção de que os fenómenos se dão espontaneamente no sentido da diminuição da energia teve a sua história e dela também falaremos numa das próximas secções.

Há outras representações bem conhecidas que os alunos possuem acerca da energia. Referimos, em resumo, as seguintes (Ogborn, 1990, p. 81, Valadares, 1994, p. 30):

- *a energia tem que ver com as coisas vivas, é uma «força natural» indispensável à vida;*
- *a energia é algo que é usado em acções concretas com os corpos, acções como transformar, mover, matar, etc.;*
- *a energia tem um poder criativo, é algo que cria os corpos.*

4.2.5 Concepções alternativas sobre o calor e a temperatura

Do mesmo modo que, há muito tempo, os manuais de Física e os professores procuram dedicar algum cuidado à identificação que os alunos fazem entre massa e peso, também se esforçam, muitas vezes com pouco êxito, por eliminar a velha confusão que os alunos fazem entre calor e temperatura. Porém, até à época das concepções alternativas, nunca foram investigadas sistematicamente as razões para tão grandes dificuldades dos alunos na compreensão desses temas.

O primeiro estudo acerca das concepções alternativas dos alunos sobre o calor e a temperatura, de que temos conhecimento, é o de Erickson (1979, pp. 221 a 230).

Dessa investigação, de outras de que tomámos conhecimento, por exemplo as de Gilbert e Watts (1983) e as de Gusne et al. (1987, pp. 25 a 32), e da nossa própria experiência, podemos concluir que os alunos possuem diversas concepções alternativas acerca do calor. Vamos referir as mais vulgares:

- *o calor aparece muitas vezes como significando o mesmo que energia interna, por exemplo em frases do tipo «este corpo contém mais calor do que aquele»;*
- *o calor surge com um significado que se confunde com a energia cinética interna, por exemplo na definição vulgar «calor é a energia do movimento das partículas de um corpo»;*
- *o calor surge como uma espécie de «calórico» que «um corpo» dá ao outro, em frases do tipo «estou cheio de calor porque comi e bebi demais»;*
- *o calor é encarado como a causa do aquecimento dos corpos, mesmo quando essa causa é um trabalho dissipado, por exemplo ao considerarem «o calor fornecido pela corrente eléctrica ao condutor»;*

- *o calor é confundido com luz*, em frases que envolvem «o calor do Sol»;
- *o calor é visto como «a energia que se transfere entre corpos a temperaturas diferentes»*, o que só é verdade se nessa transferência não ocorrer realização de trabalho.

A tabela que se segue refere algumas concepções alternativas sobre o calor e faz um breve comentário acerca de cada uma delas:

CONCEPÇÃO ALTERNATIVA	COMENTÁRIO
O calor é uma propriedade dos materiais.	O calor não é uma propriedade de um sistema já que, na passagem do sistema de um estado para outro, o calor depende do processo.
O calor é uma forma de energia contida nos corpos.	Esta concepção está patente em frases como «estou cheio de calor». É reforçada pela concepção, infelizmente ainda ensinada, segundo a qual o calor é energia cinética das partículas de um corpo (Ogborn, 1976).
O calor é um fluido que transita de uns corpos para outros.	É histórica a ideia de calor como um fluido - o <i>calórico</i> - contido nos corpos e que transita dos corpos quentes para os corpos frios.
A temperatura de um corpo é o mesmo que o calor do corpo.	Esta confusão tradicional é reforçada pelas concepções cinéticas incorrectas de que a temperatura é uma medida da energia cinética média das partículas e de que o calor é energia cinética interna.
A variação de temperatura é uma consequência e, portanto, uma manifestação do calor.	Os alunos, influenciados pela linguagem do dia a dia, consideram que um corpo é sempre aquecido pelo calor. Portanto, encaram a luz que o corpo recebe, ou o trabalho que nele se dissipa, como calor.
O frio é uma espécie de anti-calor que também se propaga .	Está patente em frases como «não deixes entrar o frio!».

4.2.6 Concepções alternativas sobre a constituição corpuscular da matéria

1. As partículas de um corpo também estão sujeitas às suas transformações

Muitos alunos têm manifestado a concepção de que as partículas de um corpo sofrem as transformações macroscópicas que o corpo revela. Assim, por exemplo, se um corpo se dilata, são as próprias partículas do corpo que «incham» e não o espaço entre as partículas que aumenta. Ou, se um sólido funde, são as próprias partículas do corpo que se derretem.

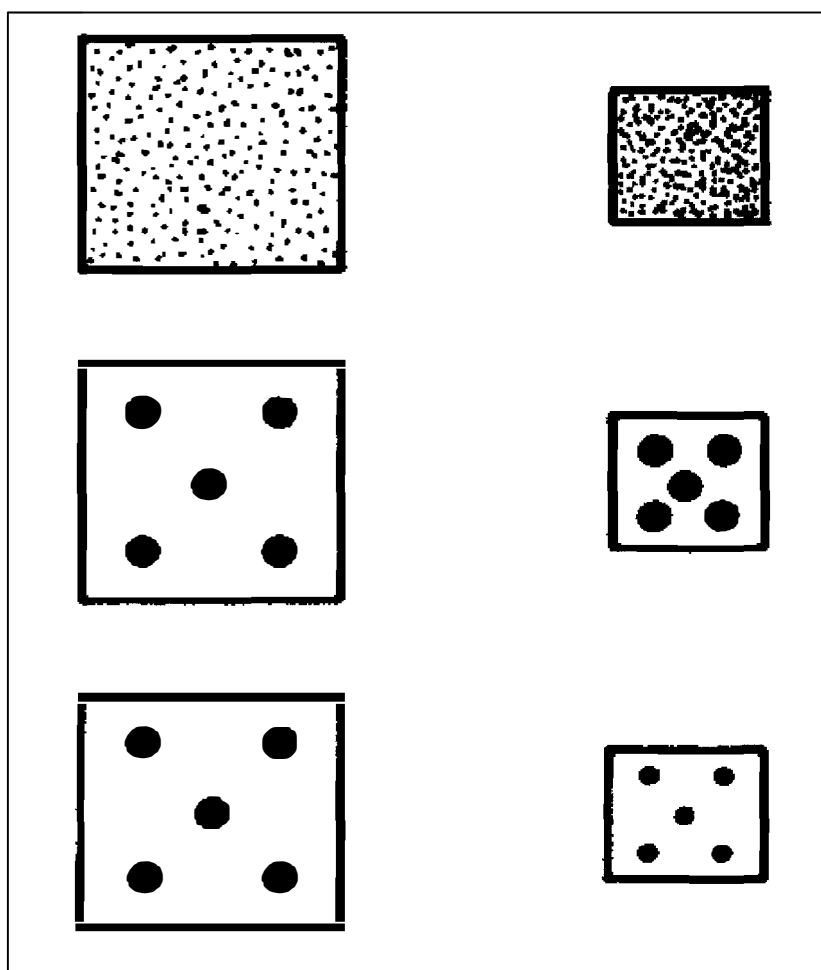
Esta concepção alternativa tem sido revelada em diversos trabalhos. Por exemplo, Furió e Hernández colocaram a alunos espanhóis a seguinte questão (1983):

Uma das propriedades mais conhecidas do ar é a compressibilidade (que consiste na redução do volume que ocupa ao ser pressionado, como pode comprovar-se facilmente com uma seringa). Como se interpreta?

a) *O ar é como uma esponja (todo contínuo) que ao apertar se comprime.*

b) *Entre as partículas existem espaços vazios ou ocos, que, quando o ar é pressionado, se tornam menores.*

c) *Ao pressionar-se, as próprias partículas comprimem-se, reduzindo o seu tamanho.*



Entre os alunos mais novos, da E.G.B. (equivalente ao nosso ensino básico) as percentagens de respostas erradas ultrapassaram os 60% em todos os anos. Mesmo entre os alunos do C.O.U. (equivalente ao nosso 12º ano), 18 % falharam nesta questão (Gil et al., 1991, p. 185).

Carrascosa, Gil, Fernández e Orozco, em 1991, confirmaram esta concepção alternativa, a propósito da fusão do ferro aquecido. Muitos alunos (69 % entre os do C.O.U.) escolheram a opção errada (de entre duas), a qual afirmava que os átomos de ferro inicialmente duros, se vão tornando cada vez mais moles à medida que a temperatura vai aumentando (Ibidem, p. 185).

Renner et al. (1990, p 40) analisaram as ideias dos alunos a propósito do conceito de expansão de um gás.

Perante uma situação em que um balão aumentava de volume devido ao aquecimento provocado por uma chama, os alunos interpretaram o fenómeno com base nas seguintes «explicações»:

- *as moléculas do gás aumentam de volume;*
- *o dióxido de carbono da chama enche o balão;*
- *o calor produz um gás.*

As crianças negam muitas vezes a existência de espaços vazios entre as partículas. (Novick e Nussbaum, 1978, Dow et al., 1978, Pfundt, 1981, Osborne e Schollum, 1983, Llorens, 1988) . Têm grande tendência a imaginar que entre elas há ar, outros gases, poeiras, ou outras coisas. Também neste aspecto as suas ideias se assemelham às dos peripatéticos, já que estes acreditavam que a «natureza tem horror ao vazio».

Para além disso, muitos alunos (mesmo universitários) têm uma visão estática dos corpúsculos, tendo grande dificuldade em aceitar o movimento destes no caso dos sólidos e dos líquidos, que vêm em repouso (Marin et al., 1994, p. 9). As crianças mais novas chegam mesmo a atribuir a esses corpúsculos comportamentos humanos, como o crescimento e a morte. (4)

4. 3. Características das concepções alternativas dos alunos

A investigação na área das concepções alternativas dos alunos, que dura há mais de uma década, proporcionou-nos o acesso a um vasto leque de dados, recolhidos em investigações um pouco por todo o lado. Estes dados, uma vez analisados, permitiram-nos sintetizar algumas características dessas concepções.

4. 3.1 A persistência das concepções alternativas

Vimos através dos exemplos conhecidos, que muitas das representações dos alunos eram comuns a alunos do ensino básico, do ensino secundário e até do ensino universitário. Algumas dessas ideias mantêm-se mesmo após vários anos de estudo formal da Física. Mesmo alguns alunos de Física com uma desenvoltura matemática acima da média têm revelado possuírem concepções alternativas acerca de importantes conceitos físicos.

Muitos investigadores têm realçado este facto de as representações alternativas dos estudantes apresentarem grande resistência à mudança (Warren, 1971, Trowbridge e McDermott, 1981, Peters, 1982, Clement, 1982, Driver, 1988, Pfundt e Duit, 1988).

Driver, por exemplo, escreveu o seguinte na sua conhecida obra «*The Pupil as Scientist?*» (1988, p. 41):

“Ainda que as aulas de Ciência possam afectar o conhecimento dos alunos, os aspectos mais fundamentais do seu pensamento parecem ser difíceis de mudar.”

Temos verificado muitas vezes que os estudantes parecem ter abandonado ideias incorrectas e assimilado uma ideia correcta acerca de determinado conteúdo da Física, mas, quando confrontados com novas tarefas que exigem a transferência da aprendizagem, voltam a cair em ideias incorrectas.

Peters realizou um estudo com alguns bons alunos universitários (1982, pp 501 a 508) e esse estudo revelou que mesmo eles apresentavam grandes dificuldades do ponto de vista conceptual, algumas delas semelhantes às dificuldades reveladas pelos estudantes com menos anos de aprendizagem da Física.

Por sua vez, Clement, da Universidade de Massachusetts, após ter verificado a existência da concepção alternativa «*movimento implica força*» (ponto 1 da secção 4.2.1) em estudantes universitários sem terem completado o estudo da Mecânica, testou também dois grupos de estudantes que tinham feito essa disciplina (1982, p. 69). O resultado foi que eles continuavam a manter essa concepção alternativa.

Nós próprios verificámos a existência de concepções semelhantes acerca da energia em alunos do 8º ano de escolaridade e em alunos do 11º ano de escolaridade que já tinham sido submetidos ao ensino de uma unidade sobre o tema «trabalho e energia» (Valadares, 1994, p. 31).

Esta persistência das concepções alternativas conduz-nos ao problema da mudança conceptual, de quais são os mecanismos inerentes a ela e por que motivo ela é tão difícil na aprendizagem da Física.

Sabemos, por exemplo, que Driver defende que um aluno só rejeitará um referencial alternativo com que funciona cognitivamente quando apreender significativamente um outro referencial que considera mais adequado ou mais fiel no modo como se adapta às novas informações (1988, pp. 41 e 45).

O modelo de Driver da mudança conceptual, bem como outros modelos tradicionais que há aproximadamente dez anos têm sido desenvolvidos não se têm revelado muito satisfatórios (Moreira, 1994). Porquê? Iremos discutir esta questão posteriormente.

4.3.2 A homogeneidade e universalidade das concepções alternativas

A investigação efectuada até ao momento também tem revelado que muitas representações dos estudantes, ainda que diferentes das representações cientificamente aceites, nem por isso deixam de ser bastante homogêneas quanto à sua natureza.

Vimos, através dos exemplos atrás apresentados, como estudantes com experiências de aprendizagem completamente diversas, em países diferentes, têm revelado ideias muito semelhantes ao interpretarem as mesmas situações físicas.

Este facto deu origem a metáforas tais como a do *aluno como cientista* (Driver, 1988, Gould, 1988) ou a da *ciência da criança* (Gilbert, Osborne e Fensham, 1982).

Segundo Clement (1982, p. 70), as concepções alternativas dos estudantes, à partida para a aprendizagem de um conteúdo da Física, são autênticos modelos conceptuais interpretativos que eles utilizam para interpretar os fenómenos, tal como os cientistas usam os seus modelos com a mesma finalidade. Acerca das diferenças desses modelos pronunciar-nos-emos noutro local. Por agora diremos que Clement chama a esses modelos baseados em preconcepções “*modelos de ordem zero*” e afirma que “*o objectivo é encontrar estratégias de ensino que encorajem os estudantes a articular e a tornarem-se conscientes das suas próprias preconcepções, efectuando previsões com base nelas. Um segundo objectivo é encorajá-los a efectuar comparações explícitas entre as suas preconcepções, as explicações cientificamente aceites e as observações empíricas convincentes*”.

Estratégias semelhantes às de Clement foram propostas por muitos outros investigadores e professores, como Fuller, Karplus e Lawson (1977), Arons (1977), etc.

4. 3.3 *A analogia entre concepções alternativas dos alunos e concepções históricas*

O grande número de dados resultantes da investigação na área das concepções alternativas dos alunos, quando confrontados com os conhecimentos históricos, apoiam a tese da existência de um paralelismo entre a evolução das ideias no ser humano (psicogénese) e a evolução das ideias na história (filogénese). Procuraremos fundamentar posteriormente ainda melhor esse paralelismo mostrando que as representações dos alunos sobre determinados conceitos e as que surgiram na evolução histórica desses mesmos conceitos têm características semelhantes e mecanismos de formação análogos. Por agora, iremos destacar vários exemplos em que é patente a analogia, quanto ao conteúdo, entre concepções reveladas pelos alunos e concepções existentes em períodos primitivos da evolução histórica dos conceitos.

Começemos pelo conceito de *força*. Vimos, em 4.2.1.1, como os alunos têm inicialmente a ideia de que *um corpo inanimado só se mantém em movimento se for actuado por uma força*, algo que impele o corpo de fora, uma espécie de «motor» externo. Ora, esta mesma concepção foi sustentada por Aristóteles. Com efeito, a respeito do movimento violento das coisas inanimadas, o estagirita escreveu o seguinte:

“Com efeito, dizer que estas coisas se movem pela sua própria natureza é impossível; porque isso é próprio dos animais e dos seres animados” (citação de Piaget e Garcia, 1987, p. 45).

Para Aristóteles, como para os seres humanos em fase inicial de aprendizagem do conceito de movimento, um corpo que não seja um ser vivo, não se move rectilínea e uniformemente por si só, como preconiza a lei da inércia. Necessita de um «motor» externo.

Aristóteles admitia a existência de dois tipos de movimentos de um corpo terrestre: o «*movimento natural*» e o «*movimento violento*». O «*movimento natural*» de um corpo é aquele em que o corpo tende a ocupar o seu «*lugar natural*», que depende do «*lugar natural*» do «*elemento*» de que é preponderantemente constituído. Os gases e vapores, por exemplo, porque são predominantemente formados pelo «*elemento ar*» cujo lugar natural é por baixo do «*elemento fogo*» mas por cima dos «*elementos terra e água*», sobem para ocuparem os seus lugares naturais. O movimento que não é «*natural*» é «*violento*», isto é, só ocorre sob a acção de um agente ou «*motor externo*», e enquanto e só enquanto esse «*motor*» actuar.

Os alunos à partida também têm a mesma representação aristotélica de que um corpo, abandonado a si próprio acaba por parar.

Passemos agora ao tema da **queda dos graves**. Para Aristóteles, o movimento de queda da chuva é um «*movimento natural*», por a chuva ser constituída, predominantemente, pelo elemento «*água*», cujo lugar natural é por baixo dos elementos «*fogo*» e «*ar*» mas por cima do elemento «*terra*».

Os alunos são naturalmente menos reflexivos, logo menos especulativos que Aristóteles (não são filósofos...), por isso o movimento habitual de queda da chuva passa-lhes praticamente despercebido. Por isso, não inventam qualquer modelo que, de longe ou de perto, se assemelhe ao modelo dos elementos aristotélicos para explicar o movimento da chuva, mas encaram-no com a mesma naturalidade com que o encarava Aristóteles, como se o destino natural da água da chuva fosse cair. E vimos (4.2.1.5) como o peso de um corpo (a gota de água por exemplo), quando as crianças ouvem falar do peso, passa a ser aquilo que «*puxa os corpos para baixo*» e é encarado como uma propriedade dos corpos, uma espécie de qualidade oculta dos corpos que com toda a naturalidade os faz cair.

Piaget, nos estudos que efectuou com crianças de diversas idades, obteve algumas justificações espontâneas para a queda dos graves muito semelhantes às dos peripatéticos.

Assim, por exemplo, uma criança de 8;7 (na notação de Piaget significa 8 anos e 7 meses) deu a seguinte explicação para a queda de uma pequena bola:

“Se a pomos aqui (partida) é preciso que ela tenha um fim para onde vai sempre, ela deve ter o seu lugar natural”.

Piaget e Garcia comentam com razão: *“Não seria possível ser-se mais peripatético quanto à queda dos graves”* (1987, p. 76).

Vimos, em 4.2.2.3, que muitos alunos, interrogados acerca da queda dos graves, afirmam que *eles atingem instantaneamente uma certa velocidade e caem com essa velocidade constante, caindo os mais pesados mais depressa*. Estas ideias traduzem exactamente a mesma representação que Aristóteles tinha para a queda dos graves, e foram por nós confirmadas em diálogo com alunos que estavam a iniciar o 8º ano de escolaridade.

Vamos ver agora o que se passa relativamente ao **movimento dos projecteis**.

No século V, João Filipónio dirigiu uma forte crítica à explicação aristotélica do movimento dos projecteis, e essa crítica foi retomada na Idade Média por João Buridan e Nicolau Oresme, entre outros.

Como resultado da sua crítica ao movimento dos projecteis no ar, Buridan concluiu que o «motor» que põe o projectil em movimento comunica-lhe uma certa «*virtus motiva*», um certo «*ímpeto*» («*impetus*»), que actua na própria direcção em que o «motor» coloca o projectil em movimento, *«quer seja para cima ou para baixo, quer lateral quer circularmente»* (Piaget e Garcia, 1987, p. 59).

As características do «*ímpeto*», tal como Buridan o concebia, eram as seguintes:

- *quanto maior era a velocidade que «o motor» comunicava ao corpo, maior era o «ímpeto» que o corpo possuía;*
- *quanto maior era a quantidade de matéria do corpo, maior era também o «ímpeto» que ele possuía.*

A investigação psicogenética mostrou que em determinada fase do desenvolvimento do pensamento das criança, estas interpretam o movimento de um projectil com base na acção de uma espécie de «motor interno», algo que foi comunicado ao projectil no acto de lançamento, uma espécie de «ímpeto». Piaget e Garcia afirmaram mesmo que as ideias das crianças acerca dos projecteis se revelam surpreendentemente análogas às de Buridan (Ibidem, p. 38).

A investigação das concepções alternativas dos alunos acerca do movimento balístico confirmou esse facto. Tal como vimos em 4.2.2.4, os alunos recorrem a um «ímpeto» tal como sucedeu numa fase medieval da evolução da ciência. As ideias espontâneas que eles têm revelado são as seguintes, de características efectivamente análogas às da teoria do ímpeto:

- *quanto mais rapidamente um corpo se move de encontro a nós «mais força ele trás»;*
- *quanto «maior» ou mais «forte» for um dado corpo, «mais força ele tem», o pugilista forte exerce um golpe com «mais força» nas luvas do débil do que a resposta que sofre por parte das luvas do débil.*

A propósito do **movimento ascensional**, recordamos aqui que os alunos, mesmo em fases mais evoluídas da sua aprendizagem da Física, recorrem a uma força dirigida para cima, maior do que o peso, para explicar o facto de o corpo subir (4.2.1.1).

Esta representação dos alunos é igual à que Galileu revelou possuir acerca do mesmo fenómeno, quando o interpretou na sua obra «*de Motu*» do modo seguinte (Clement, 1982, p. 69):

“O corpo move-se para cima desde que a força motriz imprimida seja maior do que o peso resistente. Mas tal força é, como vimos, continuamente enfraquecida; finalmente, ela fica tão diminuída que deixa de ser maior do que o peso do corpo e não o impele para além daquele ponto...”

Em suma:

As concepções dos alunos acerca do *movimento* evoluem de modo algo semelhante ao que sucedeu na história da Ciência. Passam por uma fase do «motor externo», pela de um «motor interno» ou «ímpeto», e culminam em concepções análogas às de Galileu na sua fase inicial (McCloskey, 1983, p. 114B): numa projecção vertical, por exemplo, enquanto o «ímpeto» para cima comunicado ao corpo predomina sobre o peso, o corpo move-se para cima; o «ímpeto» vai diminuindo; finalmente, o «ímpeto» fica tão fraco que o peso se torna maior que ele, e o corpo, então, começa a cair.

Passemos agora à *inércia* e ao histórico «ímpeto circular» dos corpos.

É sobejamente conhecido que Aristóteles considerava platonicamente o movimento circular como perfeito, e dedicou o capítulo 2 do livro I da sua obra «*Do Céu*» à demonstração da existência de um «*quinto elemento*» ou «*quinta essência*» dotado desse movimento circular perfeito. Os astros incorruptíveis eram constituídos, segundo ele, por essa «*quinta essência*» e o seu movimento natural era circular.

Posteriormente, Buridan falou num «ímpeto que seguia numa direcção circular». E este «ímpeto circular» fez história, dificultando extraordinariamente a compreensão da inércia e o estabelecimento da lei que a governa.

Mais tarde, Galileu, apesar de toda a sua genialidade, não conseguiu libertar-se da ideia desse ímpeto circular, continuando a considerar que os corpos em redor da Terra descrevem circunferências sem estarem actuados por forças, em clara contradição com as leis em que assenta a Mecânica Clássica.

Os alunos possuem ideias análogas a estas, baseadas no «ímpeto que segue numa direcção circular». Vimos em 4.2.3.1 que os alunos possuem a ideia de que um corpo a mover-se em trajectória circular permanece na mesma trajectória circular se for abandonado a si mesmo. Os corpos, ao serem obrigados a circular dentro de

uma calha, adquirem um «*ímpeto circular*» que os mantém a circular uma vez abandonada a calha. Se esta tem mais voltas, o «*ímpeto circular*» adquirido é maior, e os corpos mantêm-se a curvar mais tempo.

Numa outra pesquisa que Kohl, Washburn e McCloskey efectuaram com estudantes dos últimos anos do ensino secundário e dos primeiros anos da universidade, verificaram que os alunos interpretavam muitas situações de movimento “*estabelecendo a teoria do ímpeto quase explicitamente*” (McCloskey, 1983, p. 115).

As ideias que os alunos têm revelado possuir acerca da **energia** e do **calor** (4.2.4 e 4.2.5) também se assemelham às que os cientistas tiveram em fases primitivas da construção desses mesmos conceitos. Nós próprios, no âmbito deste trabalho, levámos a cabo um estudo acerca das concepções de alunos do 8º ano e do 11º ano de escolaridade sobre a energia e confirmámos isso mesmo (Valadares, 1994).

Os alunos, por exemplo, confundem força com energia. Ora, a confusão entre força e energia também existiu na história da ciência, conforme transparece, por exemplo, dos títulos das seguintes obras pioneiras da Termodinâmica:

- «*Observações acerca das forças da natureza inanimada*», publicada por J. Mayer em 1842.
- «*Sobre a conservação da força*», da autoria de Helmholtz, escrita em 1847.
- «*Sobre a força motriz do calor e as leis que podem deduzir-se do estudo desta questão, aproveitáveis para a teoria do calor*», cujo autor foi Clausius, publicada em 1850.

É sabido como a existência da **gravidade** constituiu um grande mistério na história da Ciência. Não foi por acaso que Newton, ao construir a teoria da atracção gravítica universal, foi alvo de fortes críticas e acusado de peripatético, por defender uma tão estranha «qualidade oculta» dos corpos, como é essa de cada corpo ter a propriedade de atrair outros à distância através do espaço vazio. Se o espaço era considerado vazio, o que é que transmitia a força? (5).

A teoria cartesiana dos turbilhões, apesar de confusa, continuava a ser preferida por muitos pensadores, porque sempre considerava o espaço cheio com os astros a serem impulsionados pelos turbilhões e não atraídos misteriosamente.

Foi o facto de, a partir da teoria de Newton, se deduzir as leis de Kepler, que descrevem o movimento dos planetas, e a teoria dos turbilhões de Descartes estar em desacordo total com as mesmas leis, que ajudou a impor a teoria newtoniana. Para a sua imposição em França, muito contribuiu o espírito subtil e malicioso de Voltaire. São dele as seguintes palavras:

“É espantoso que, após os protestos solenes deste grande filósofo (refere-se a Newton), o Senhor Saurin e o Senhor de Fontenelle, eles próprios merecedores deste nome, o tenham criticado duramente pelo peripatetismo (...) Quase todos os franceses, sábios ou não, repetiram esta crítica. Ouve-se dizer em todo o lado: «Porque é que não utiliza a palavra impulsão, que se compreende tão bem, em vez do termo atracção, que não compreendemos?» (Voltaire, 1992, p. 68).

Se os pensadores do tempo de Newton não compreendiam esta estranha atracção gravítica, se até o próprio Newton a achava estranha, não é de estranhar que os alunos de Física a não compreendam. E se hoje alguém afirma compreender a gravitação universal é apenas porque domina um modelo conceptual altamente abstracto e evoluído estudado na Teoria da Relatividade Geral.

Os alunos, mesmo com alguns anos de aprendizagem de Física, jamais poderão construir modelos interpretativos que, de perto ou de longe, se comparem ao modelo evoluído de que a Ciência dispõe hoje para interpretar a gravitação. Portanto, estão numa situação em tudo semelhante à dos filósofos a que se refere Voltaire, que tentaram familiarizar-se com a teoria de Newton mas encontraram o mesmo bloqueio psicológico dos nossos alunos de hoje.

Em fases primitivas da sua evolução cognitiva, os alunos atribuem às forças gravitacionais uma conotação magnética envolvida num certo misticismo, tal como Kepler fez antes de Newton ao interpretar a acção do Sol que faz girar os planetas em seu redor, numa fase anterior da evolução do conhecimento científico (6). E, em fases ainda mais primitivas, as crianças reconhecem a existência de forças misteriosas que «*puxam os corpos para baixo*», mas atribuem-lhe qualidades ocultas nos próprios corpos, tal como faziam os pensadores medievais (4.2.1.5).

Para além das grandes semelhanças, quanto ao conteúdo, entre as representações espontâneas dos alunos e as que surgiram em certos períodos da história da Ciência, também há grande analogia no que respeita às respectivas *características*. Assim, por exemplo, a história da Ciência revela-nos como muitas das ideias defendidas em determinadas épocas se revelaram resistentes à mudança, tal como sucede com as ideias dos alunos.

Em 1961, Barber publicou um estudo que realizou, cuja tese é a de que *os cientistas resistem à mudança das suas ideias tanto quanto podem, mesmo quando postos perante argumentos convincentes de outros cientistas* (citação de Gauld, 1989, p. 66).

Um dos grandes objectivos de Piaget, no último período da sua vida, foi investigar se os *mecanismos da passagem de um período da história da Ciência ao seguinte* têm algum paralelismo com os mecanismos de passagem do pensamento de uma criança de um estágio psicogenético ao seguinte.

Os resultados que conhecemos dessa sua investigação constam de uma excelente obra, a que nos temos vindo a referir, escrita com o físico Rolando Garcia e intitulada «*Psicogénese e História das Ciências*» (a tradução portuguesa dessa obra é de 1987).

O paralelismo entre a evolução do pensamento histórico e do pensamento da criança sobre o mundo físico é uma das grandes teses de Piaget e é-o também neste trabalho. Piaget mostrou existir um paralelismo, em termos de conteúdo e mecanismos, entre as fases históricas anteriores a Newton e as etapas da psicogénese.

Defendeu também que o paralelismo permanece sempre no que diz respeito aos “*mecanismos*” inerentes a cada fase e à passagem de fase para fase (7).

Regressaremos a este tema no último capítulo. Mas podemos já adiantar algumas ideias de Piaget a respeito do paralelismo dos mecanismos psicogenético e filogenético do seguinte modo:

- *A natureza dos raciocínios, tanto a nível da psicogénese como da história das ciências, comporta o que Piaget designa por “abstracções reflexivas”* e abstracções “empíricas”. Comporta, ainda, diferentes tipos de generalizações (Piaget refere-se a generalizações construtivas” e “extensionais”).*
- *Em ambos os casos não há experiências puras; todo o facto implica necessariamente uma interacção entre o sujeito e os objectos (de acordo com um dos princípios que formulámos no capítulo anterior).*
- *A evolução do conhecimento não se realiza ao sabor do acaso, mas por uma série de estágios sequenciais.*
- *A evolução do conhecimento parte das construções sensório-motoras para formas superiores do pensamento científico, e tem inerente um duplo processo de sensações e de interacções.*
- *Há a procura de justificações tanto para os êxitos como para os fracassos e as justificações implicam a relação dos resultados obtidos com as estruturas ou coordenações de esquemas.*

- *O conteúdo do estágio anterior é sempre integrado no do estágio posterior.*
- *Parte-se da análise dos objectos para o estudo das relações ou transformações, e daí para a construção das estruturas.*

4.3.4 As concepções alternativas surgem muitas vezes escondidas pela linguagem técnica.

A investigação tem revelado que muitos estudantes que têm sucesso na resolução de questões triviais de aplicação, revelando um bom domínio quer da linguagem técnica quer do formalismo matemático, também possuem concepções alternativas que transparecem quando são sujeitos a questões não triviais ou a entrevistas do tipo piagetiano para análise de experiências práticas.

Trowbridge e McDermott, por exemplo, escreveram o seguinte após a investigação que efectuaram sobre as concepções dos estudantes acerca do conceito de velocidade (4.2.2.1):

“Tornou-se patente, através da nossa investigação, que a utilização pelos estudantes de termos técnicos não corresponde necessariamente à compreensão física de como estes termos diferem uns dos outros e de como se relacionam com a experiência física” (1980, p. 1028).

A idêntica conclusão chegaram muitos outros investigadores, entre os quais os brasileiros Villani e Pacca, ao investigarem o raciocínio espontâneo de estudantes graduados em Física em situações de relatividade de grandezas cinemáticas e de colisões de corpos (1990, p. 594).

4.4. Origens das concepções alternativas dos alunos

No capítulo anterior defendemos algumas posições relativamente a determinados problemas acerca do conhecimento do mundo físico. Uma dessas posições é a de que não devemos ser cépticos nem dogmáticos relativamente à existência do conhecimento físico. Construimos um conhecimento acerca da realidade exterior ao homem, mas não devemos ter o pretenciosismo de proclamar que esse conhecimento é completo e retrata de modo inquestionável essa realidade. Tudo o que sabemos sobre as coisas são conjecturas, mais ou menos bem fundamentadas, architectadas ao longo da história por uma comunidade humana: a comunidade científica.

Por mais que os nossos progenitores tenham tido um conhecimento profundo da Ciência, e tenham estado imbuídos do espírito científico de que falámos no capítulo anterior, esse património não nos é transmitido geneticamente.

O filho de um cientista poderá nascer com uma arquitectura neural favorável para o domínio do conhecimento científico, mas vai ter que construir e reconstruir os seus próprios significados das coisas que o cercam a partir do fluxo de informação do exterior.

Ao processar a informação proveniente do mundo exterior, o cérebro de cada ser humano constrói as suas próprias representações alternativas desse mundo, algumas delas bastante afastadas das ideias que a Ciência construiu e com as características acabadas de referir.

Essas representações alternativas têm certamente algumas origens. Como os circuitos neurais do cérebro humano são comandados de modo complexo, através da interacção da mente (englobando todas as suas componentes, consciente, subconsciente e inconsciente), com o corpo e o mundo exterior, essas origens devem ser complexas, certamente englobando diversos factores em simultâneo.

Apenas por razões metodológicas, vamos tentar encontrar essas origens explorando três vias, em separado: uma via *predominantemente epistemológica*,

outra predominantemente *psicológica*, e outra ainda fundamentalmente *sociológica*.

Começamos pela **via epistemológica**. Defendemos na fundamentação deste trabalho e na secção anterior a existência de um isomorfismo entre as construções do conhecimento físico por cada indivíduo e ao longo da história.

A história da Ciência mostra-nos como o mundo iludiu os sentidos de quem o pretendeu compreender, sendo enorme o número de representações actualmente consideradas incorrectas que perduraram durante gerações. Recordamos, a título de exemplo, as ideias aristotélicas sobre a queda dos graves, na sua essência ainda válidas no tempo de Galileu. Lembramos, também, as concepções absolutas do movimento baseadas num quadro espaço-temporal newtoniano, existindo para além dos corpos e dos seus movimentos, que só viriam a ser modificadas pela Teoria da Relatividade Restrita três séculos após o seu aparecimento.

Tal como sucedeu com os pensadores aristotélicos, relativamente à evolução do espírito científico a que no capítulo anterior nos referimos, também os nossos alunos, numa fase incipiente do desenvolvimento do seu espírito científico individual, possuem pensamentos intuitivos baseados no senso comum, que os conduzem à ilusão e ao engano. O pensamento físico, abstracto como é, exige um grau de precisão lógica, uma sofisticação de tipos de raciocínios, capacidades matemáticas que facilitam o pensamento e só se adquirem com o tempo e com a maturação.

As concepções alternativas dos alunos revelam-se como crenças espontâneas, intuitivas, formas muito idiossincrásicas e cientificamente pouco evoluídas de ver e sentir o mundo, no fundo maneiras pessoais de interpretar os fenómenos. Este pensamento espontâneo acerca dos fenómenos, que antecede o pensamento crítico, acaba por se traduzir num bloqueio a esse mesmo pensamento crítico que está na base da construção do conhecimento científico evoluído, de acordo com um princípio epistemológico fundamentado no capítulo anterior.

Concretizemos com o exemplo de uma concepção alternativa sobre Astronomia de que tomámos conhecimento no último congresso sobre concepções alternativas em Ciência e Matemática na Universidade de Cornell (8):

Um entrevistador pediu a vários alunos, na cerimónia da sua graduação pela Universidade de Harvard (uma das mais prestigiadas universidades americanas), que lhe explicassem a existência das estações do ano, o motivo por que há um Inverno frio e um Verão quente.

Muito embora os alunos entrevistados tivessem concluído com êxito várias cadeiras de Física (e possuísem vastos conhecimentos de Astrofísica), eles responderam que a existência de Inverno ou Verão se deve ao facto de a órbita da Terra ser uma elipse em que o Sol ocupa um dos focos e, portanto, variar a distância entre a Terra e o Sol.

A representação desses alunos acerca das estações do ano era a de que *é Verão quando a Terra está mais perto do Sol e Inverno quando a Terra está mais afastada do Sol*.

Ora, a realidade é exactamente oposta: no seu país, a América, é Verão quando a Terra está mais afastada do Sol, e é Inverno quando a Terra está mais próxima do Sol. As estações do ano têm, fundamentalmente, que ver com a inclinação do eixo da Terra em relação ao plano da sua órbita, conforme se aprende a um nível bastante elementar.

Não restam dúvidas de que os alunos tinham estudado o movimento dos planetas em torno do Sol e tinham, portanto, conhecimento da inclinação do eixo da Terra. Então porque responderam mal?

Todos os dias vemos fontes de calor e luz a aquecer-nos e a iluminar-nos. Os nossos sentidos vão-nos habituando à ideia de que, quanto mais nos aproximamos da fonte de luz e calor, mais ela nos ilumina e aquece. Sabendo os alunos que o Sol é a fonte que nos ilumina e aquece, que a Terra descreve uma elipse ao longo de um ano estando ora mais próxima ora mais afastada do Sol (num dos focos da

elipse), não será normal que tenham respondido, espontânea e intuitivamente, que o Verão, quente, se deve à proximidade do Sol, e o Inverno, frio, se explica pelo afastamento do mesmo?

A intuição empírica dos alunos conduziu-os à ilusão. As suas respostas, porque não resultaram de uma abstracção reflexiva, porque foram pouco trabalhadas pela razão, revelaram-se erradas.

Referimos no capítulo anterior que o que marcou o progresso científico do Renascimento foi o aparecimento de um novo espírito científico, a que correspondeu uma nova atitude face à informação proveniente da Natureza. É esta nova atitude que também se deve ir procurando desenvolver nos estudantes de Ciência. O espírito científico dos estudantes está em formação. Ora, como afirma Bachelard (1981, p. 170):

“Na formação de um espírito científico, o primeiro obstáculo é a experiência inicial, é a experiência situada antes e acima da crítica, que é necessariamente um elemento integrante do espírito científico. Dado que a crítica não operou explicitamente a experiência inicial, não pode, em caso algum, constituir um apoio seguro. (...)

Eis, então, a tese filosófica que iremos defender: o espírito científico tem de se formar contra a Natureza, contra aquilo que, em nós e fora de nós, é o impulso e a instrução da Natureza, contra o entusiasmo natural, contra o facto colorido e variado. O espírito científico tem de se formar deformando-se. Perante a Natureza, ele não pode instruir-se senão purificando as substâncias naturais e ordenando os fenómenos misturados.”

Os alunos graduados por uma universidade de prestígio não resistiram ao «entusiasmo natural». Não conseguiram «purificar» suficientemente as informações da Natureza e por isso caíram na ilusão dos sentidos.

O processo de conhecimento de um fenómeno começa muitas vezes por uma experiência primeira a partir da qual o sujeito estabelece espontaneamente determinadas concepções cientificamente inadequadas acerca do fenómeno, porque ainda não decorreu todo o processo dialéctico do conhecimento que vai ocorrendo na mente e durante o qual as concepções existentes vão sendo «filtradas» pelas formas superiores do pensamento científico. Uma das origens das concepções alternativas dos alunos é, portanto, o seu espírito científico ainda imaturo, incapaz de reduzir por abstracção a complexidade da experiência vulgar, da experiência do dia a dia, da experiência conforme com o senso comum, pensando holisticamente a respeito desta e baseando-se em falsas analogias.

O conhecimento do mundo físico que vai ocorrendo ao longo da aprendizagem da Ciência é um processo de interacção dialéctica entre um sujeito, que neste caso é o estudante de Ciência, e um objecto, que poderá ser um qualquer objecto ou fenómeno do mundo exterior. Partindo do princípio da existência de um paralelismo entre o desenvolvimento do pensamento histórico e do pensamento individual de cada aluno, afirmamos que a referida interacção dialéctica intrasubjectiva ocorre do modo caracterizado no capítulo anterior. Vimos como as crenças e convicções de ordem metafísica influenciaram essa interacção sujeito-objecto. Salientámos também o papel importante da intuição e da criatividade nessa relação. Referimos a importância dos modelos construídos. O referido princípio leva-nos a admitir que a presença ou ausência de todos estes factores referidos também faz sentir os seus efeitos no pensamento dos alunos.

A nossa experiência e conhecimento sustentam a ideia de que as crenças e convicções metafísicas estão na base de concepções alternativas. Vimos, por exemplo, como alguns alunos nossos possuíam a concepção alternativa de que a energia é uma espécie de força cósmica que governa a nossa vida, e essa noção assentava em convicções de ordem religiosa.

Passemos agora a discutir as origens das concepções alternativas expondo uma **via psicológica**.

Vamos, então, à procura de possíveis deficiências no modo como ocorre o mecanismo psicológico do pensamento que estejam na origem de concepções alternativas.

Numa *perspectiva piagetiana*, o conhecimento é um processo que vai evoluindo no ser humano à medida que o seu pensamento se vai desenvolvendo, isto é, à medida que se vão reorganizando as suas estruturas numa sequência de estádios de desenvolvimento. Esses estádios de desenvolvimento são, segundo Piaget, os seguintes:

- *estádio da inteligência sensório-motora* que se prolonga desde o nascimento até ao aparecimento da linguagem;
- *estádio de preparação e de organização da inteligência operatória concreta*, em que a criança ainda possui, tão só, a capacidade de pensar sobre coisas concretas;
- *estádio da inteligência operatória formal*, em que o adolescente adquire a capacidade do pensamento abstracto, passa a ser capaz de pensar sobre o seu próprio pensamento e sobre o pensamento das outras pessoas e utiliza facilmente a linguagem simbólica nos seus raciocínios sobre conceitos abstractos.

Segundo essa perspectiva, a *acção* do sujeito, o modo como ele interacciona com o meio ambiente, é fundamental para a construção do conhecimento. Essa acção organiza-se em esquemas. Os primeiros *esquemas* do recém-nascido são muito simples: correspondem aos chamados reflexos. Esses esquemas vão evoluindo, vão-se aperfeiçoando, vão-se coordenando e reorganizando para dar lugar a *estruturas* cada vez mais complexas. *Os tijolos do conhecimento são os esquemas e as estruturas* (Ribeiro, 1990, p. 57), os diferentes modos como é organizada a actividade do sujeito. Os esquemas e as estruturas em que se organiza a acção de um sujeito vão mudando, consistindo essa mudança no desenvolvimento intelectual desse sujeito.

Ao contrário dos esquemas e das estruturas que vão evoluindo, há dois aspectos que são invariantes ao longo do desenvolvimento: a *assimilação* e a *acomodação* do sujeito.

A *assimilação* consiste na incorporação da informação do ambiente. A *acomodação* consiste na modificação das estruturas por influência da acção do sujeito. Quando a assimilação e a acomodação estão em equilíbrio diz-se que ocorre a *adaptação* do sujeito.

“O conhecimento elementar nunca é o resultado de uma simples impressão deposita pelos objectos nos órgãos sensoriais, mas é sempre devido a uma assimilação activa do sujeito que incorpora os objectos nos seus esquemas sensório-motores (...)

A aprendizagem em função da experiência não é, pois, devida a pressões passivamente sofridas pelo sujeito, mas sim à acomodação dos seus esquemas de assimilação. Um determinado equilíbrio entre a assimilação dos objectos à actividade do sujeito e a acomodação desta actividade aos objectos constitui, assim, o ponto de partida de qualquer conhecimento e apresenta-se, desde o início, sob a forma de uma relação complexa entre o sujeito e os objectos (...)

É precisamente deste equilíbrio progressivo da assimilação e da acomodação que depende essa evolução” (Piaget, 1976, pp. 127 e 128).

Podemos considerar que o processo de desenvolvimento intelectual de cada ser humano assenta nos seguintes factores:

- a sua *maturação*, que consiste num processo evolutivo em que os circuitos neurais se vão modificando, conduzindo à maturidade;
- a *experiência* que vive, incluindo a experiência física a partir da qual abstrai as propriedades dos objectos e a experiência lógico-matemática, que consiste na organização dos dados recolhidos da experiência física;
- a *transmissão social*, ou informação veiculada através de outras pessoas.

Os factores de conhecimento são coordenados por meio da *equilibração*, que consiste num mecanismo de auto-regulação psicológica. Todo o desenvolvimento se processa no sentido da procura de um equilíbrio entre a assimilação dos dados dos objectos e a acomodação dos sujeitos. Da situação de desequilíbrio resultante da adaptação à experiência, a auto-regulação psicológica procura sempre atingir um novo equilíbrio.

Os estádios de desenvolvimento intelectual têm carácter integrativo, isto é, em cada estágio de desenvolvimento torna-se necessário reconstruir de novo os resultados obtidos no estágio anterior, antes de os alargar e construir novos resultados.

Em termos estritamente piagetianos, e partindo do princípio de que a maturação ocorre biologicamente de um modo normal, há que atribuir às *más experiências escolares vividas pela criança e a deficiências de transmissão cultural* as dificuldades cognitivas reveladas pelos estudantes. O uso inadequado da linguagem pelos adultos que cercam a criança e certas formas de ensino inadequadas ao desenvolvimento psicológico da criança só servem para a lançar num pântano de confusões.

A actividade assimiladora do sujeito encontra no meio exterior obstáculos à sua livre actuação. Esses obstáculos originam uma certa «tensão» que o sujeito tenta eliminar através das suas capacidades de acomodação. Desaparecida a «tensão», desapareceu o obstáculo. Porém, logo surgirão outros obstáculos colocados pelo meio e assim sucessivamente. O desenvolvimento intelectual é, segundo Piaget, uma remoção permanente de obstáculos colocados pelo meio exterior. Podemos afirmar que se trata de uma actividade permanente de *resolução de problemas*. Sem problemas a resolver não haverá a referida tensão, sem esta não ocorrerá a acomodação, e o desenvolvimento não se dará. Mas, por outro lado, se os obstáculos que se colocam a uma aluno não estiverem adequados ao seu desenvolvimento actual, a sua capacidade de acomodação não será capaz de vencer a referida tensão, e haverá um choque psicológico que conduzirá ao desânimo e ao fracasso.

Na perspectiva psicológica de Piaget, acabada de referir nos aspectos que interessam para este trabalho, podemos incluir como causas das dificuldades cognitivas de um aluno e de muitas das concepções cientificamente erradas que possui, as seguintes:

- deficiências dos *curricula* formais, com alguns programas de ensino perfeitamente desajustados às possibilidades dos alunos;
- as estratégias seguidas pelo professor, que muitas vezes tornam alguns conteúdos desadequados ao estado de desenvolvimento do aluno;
- a linguagem cientificamente inadequada, ambígua, que pais, professores e restantes adultos adoptam junto do aluno;
- um ensino rotineiro que não recorre por sistema a verdadeiros problemas adequados ao nível de desenvolvimento do aluno.

A perspectiva psicológica piagetiana, ainda que tenha constituído um fundamento notável para o desenvolvimento da psicologia construtivista, tem vindo ultimamente a ser desvalorizada com base em trabalhos recentes de Psicologia da Educação (ver, por exemplo, Novak, 1992). Não tomando em linha de conta o papel de determinados factores decisivos para o desenvolvimento, como seja o papel da própria aprendizagem escolar, quando bem conduzida, a visão psicológica de Piaget torna-se demasiado rígida no que se refere aos períodos temporais dos estádios de desenvolvimento cognitivo.

Alguns resultados de investigações feitas com crianças, a quem foram aplicados os próprios instrumentos de Piaget, revelaram resultados inexplicáveis em termos da teoria piagetiana (Novak, 1992).

Outro aspecto que a teoria psicológica de Piaget não contempla é a influência, hoje considerada importante, da componente afectiva, concretamente dos sentimentos e das emoções, no desenvolvimento cognitivo do aluno.

A história da Ciência mostra-nos como as crenças e as paixões dos cientistas afectaram a construção da sua ciência, para o melhor e para o pior. Se na produção

artística a componente emocional interfere decisivamente, na produção científica essa componente também interfere, por vezes substancialmente. Na construção das hipóteses científicas, nos grandes «saltos no escuro», a parte afectiva (a que recusamos chamar componente irracional) é importante.

De modo paralelo, as emoções e os sentimentos de cada aluno influenciam a sua aprendizagem, tornando-a eminentemente idiossincrásica. Já há muito tempo que, na nossa actividade docente, nos apercebemos de que muitas dificuldades sentidas por alunos têm uma forte origem afectiva. Encontrámos, por exemplo, alunos que eram razoáveis ou mesmo bons numa disciplina e que, por criarem um sentimento de repulsa para com o professor, passaram a ter grande dificuldade em apreenderem o seu conteúdo. Vimos alunos a falarem apaixonadamente da Astronomia e a estudarem com elevado rendimento as matérias com ela relacionadas. Presenciámos o entusiasmo com que quase todos os alunos de uma turma do 12º ano participaram num curso livre sobre Teoria da Relatividade Restrita e o sentido crítico que revelaram (muito superior ao que revelavam nas aulas normais) ao discutir problemas para eles complexos como os famosos «paradoxos» dos gémeos e da vara e do tubo.

A ligação entre emoções e sentimentos, por um lado, e corpo e cérebro por outro, é actualmente defendida mesmo em termos neurobiológicos. *“Os níveis mais baixos do edifício neurológico da razão são os mesmos que regulam o processamento das emoções e sentimentos e ainda as funções do corpo necessárias para a sobrevivência do organismo. Por sua vez, estes níveis mais baixos mantêm relações directas e mútuas com praticamente todos os órgãos do corpo, colocando assim o corpo directamente na cadeia de operações que dá origem aos desempenhos do mais alto nível da razão, da tomada de decisão e, por extensão, do comportamento social e da capacidade criadora. Todos estes aspectos, emoção, sentimento e regulação biológica, desempenham um papel na razão humana. As ordens de nível inferior do nosso organismo fazem parte do mesmo circuito que assegura o nível superior da razão”* (Damásio, 1995, p. 15).

Uma outra perspectiva psicológica diferente da de Piaget é a do psicólogo russo Vygotsky. Actualmente assiste-se a uma valorização crescente da perspectiva deste psicólogo contemporâneo de Piaget mas falecido prematuramente, particularmente da sua teoria do desenvolvimento potencial da criança, segundo a qual “*a aprendizagem escolar orienta e estimula processos internos de desenvolvimento*” (Vygotsky, 1991, p. 49).

Segundo este psicólogo russo, o processo de desenvolvimento acompanha o processo da aprendizagem. Boas experiências de aprendizagem estimulam a área de desenvolvimento potencial de um aluno. Más experiências de aprendizagem vividas por um aluno de idêntico desenvolvimento efectivo reflectem-se negativamente na sua área de desenvolvimento potencial. Em consequência, essas diferenças na aprendizagem reflectir-se-ão no futuro por um maior desenvolvimento efectivo do primeiro aluno, aquele que viveu boas experiências de aprendizagem. Daí a célebre máxima de Vygotsky: “*o único bom ensino é o que se adianta ao desenvolvimento*” (Ibidem, p. 46).

Entre os investigadores actuais em educação que mais criticam a psicologia de Piaget, podemos talvez destacar os da linha ausubeliana (ver, por exemplo, Novak, 1992).

Vamos, pois, passar a analisar o problema das concepções alternativas à luz da psicologia de Ausubel.

Na **psicologia ausubeliana**, o conceito mais importante é o de **aprendizagem significativa**. Uma determinada informação, a que um estudante tem acesso, é apreendida significativamente quando ela «ancora» na informação já previamente existente na estrutura cognitiva do ser humano. Por outras palavras: o pensamento baseia-se na relação de conceitos e a aprendizagem significativa ocorre quando os novos conceitos se relacionam de modo substantivo com os conceitos previamente existentes na estrutura cognitiva.

Na **aprendizagem significativa** ocorre uma incorporação não-arbitrária do novo conhecimento na estrutura cognitiva de quem aprende. Tal incorporação exige determinadas condições, pois só com elas presentes poderá haver ligação dos novos conceitos com os conceitos mais inclusivos de que o aprendiz já dispõe - chamados **subsunçores** ou **conceitos integradores**. Essas condições são:

- que o *material* de aprendizagem seja *potencialmente significativo*, isto é, tenha significado lógico e psicológico, seja internamente coerente e, além disso, coerente com a estrutura cognitiva prévia (9);
- que haja uma *disposição*, um *esforço* do aluno no sentido de haver uma relação entre o novo conhecimento e o conhecimento anteriormente existente.

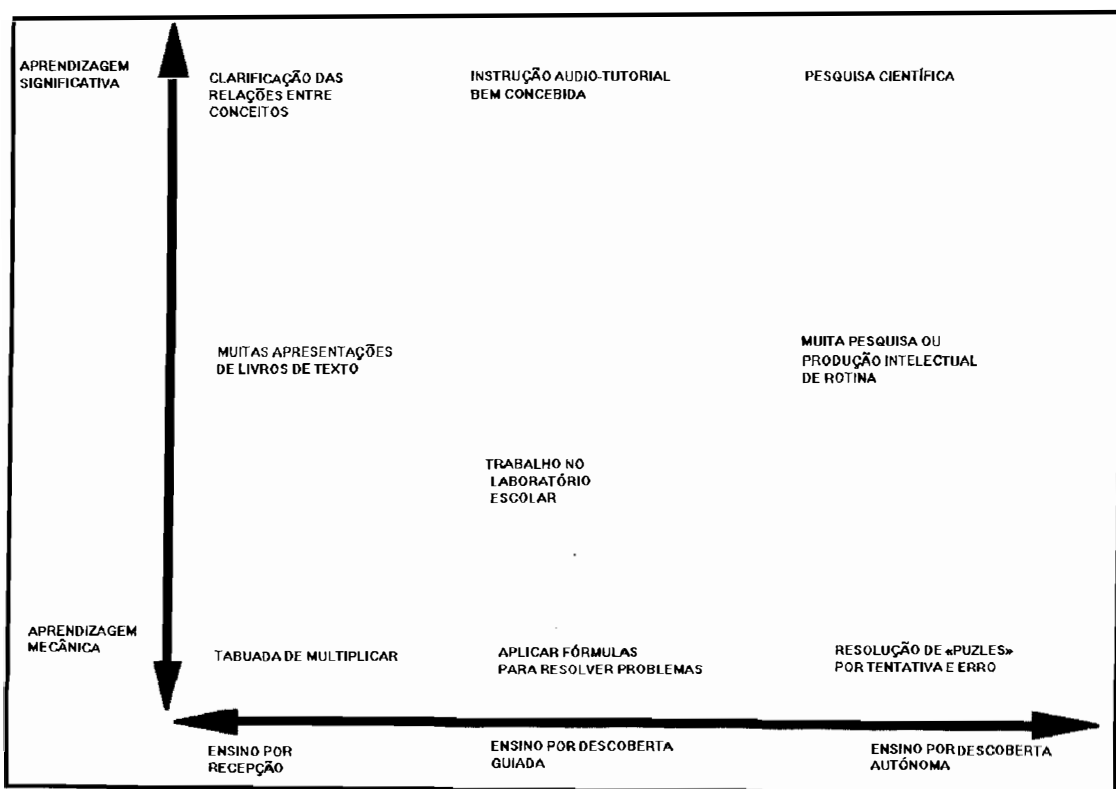
Só reunidas estas condições, os novos conhecimentos apreendidos poderão «fazer sentido» à luz das experiências que o aprendiz tem com os objectos ou os acontecimentos. «Fazer sentido» significa a assimilação em compreensão, o que só sucede se os novos conceitos se relacionarem de um modo substantivo com os conceitos já existentes na estrutura cognitiva.

A aprendizagem significativa opõe-se à **aprendizagem mecânica** ou **aprendizagem rotineira**, em que o novo conhecimento é incorporado na estrutura cognitiva de um modo arbitrário, não substantivo, não é associado aos conceitos já lá existentes. Isto acontece ou porque o conteúdo a aprender não é potencialmente significativo, e/ou porque não houve qualquer esforço de o relacionar de modo não arbitrário com o conhecimento prévio (Ausubel et al., 1980).

À luz da perspectiva ausubeliana actual, o processo de ensino-aprendizagem envolve duas «variáveis» distintas, o ensino e a aprendizagem. Esta depende da primeira, mas isso não significa que haja um ensino que implique necessariamente uma boa aprendizagem.

Com efeito, o *ensino* é uma «negociação» de significados de quem ensina com o aprendiz, mas a *aprendizagem* é um processo construtivo, eminentemente pessoal, idiossincrásico, em que as ideias do aprendiz vão sendo construídas e reconstruídas numa actividade (que envolve o seu todo, corpo e mente) tal que é influenciada pelos mais diversos factores que ultrapassam por completo quem ensina. Cérebro e corpo estão integrados e permanentemente interactivos com o meio ambiente físico e social. Sentimentos, emoções, acções, tudo se conjuga para a alteração do significado acerca da experiência do mundo exterior.

De acordo com Ausubel, os tipos de aprendizagem são os seguintes (Ausubel et al., 1980, p. 21):



Quadro traduzido e adaptado de Novak (1992, p. 2.20)

O processo de ensino-aprendizagem pode, então, ser considerado um «espaço contínuo bidimensional», isto se aplicarmos, metaforicamente, uma linguagem matemática:

- Uma das «dimensões» é um contínuo que vai da **aprendizagem significativa**, num extremo, até à **aprendizagem rotineira**, no outro extremo, diz respeito fundamentalmente ao modo como o aluno aprende, embora tendo que ver com o ensino. Na aprendizagem significativa, o novo material a aprender é incorporado de modo significativo na estrutura cognitiva do aluno, estabelecem-se ligações com significado entre os novos conceitos e os que já lá existiam. Pelo contrário, na aprendizagem mecânica o novo material é incorporado de modo arbitrário na estrutura cognitiva, não se estabelecem essas ligações significativas.
- A outra «dimensão», igualmente contínua, diz respeito fundamentalmente ao ensino, pois tem que ver com a forma como o material a apreender é apresentado ao aprendiz, mas, é claro, também irá ter que ver com a aprendizagem do aluno. Num extremo está o **ensino** voltado para a **descoberta autónoma**, em que o conteúdo a apreender não é apresentado ao aluno, terá de ser por ele descoberto. No outro extremo temos o **ensino** que aponta para a **recepção** do conteúdo a apreender, em que este é apresentado ao aluno na sua forma final.

Quer na perspectiva de Piaget quer na de Ausubel, as estruturas da inteligência não são inatas. O ser humano não nasce inteligente. O que é inato é o factor biológico à partida, são as condições iniciais para se dar o desenvolvimento normal da inteligência. A inteligência vai-se desenvolvendo ao longo da existência do ser humano.

A diferença essencial entre as duas perspectivas está no papel que a aprendizagem poderá desempenhar no desenvolvimento da inteligência. Assim:

- Na perspectiva de Piaget, o desenvolvimento da inteligência do ser humano é bastante estereotipado: ocorre por degraus bem definidos, que se sucedem lenta e laboriosamente. Em cada degrau todas as crianças têm de conseguir determinados resultados, e no degrau seguinte têm de reconstruir esses mesmos resultados antes de alargarem as suas perspectivas e conseguir novos resultados. Os estádios sucedem-se lentamente, através de um mecanismo de assimilação-acomodação.
- Na perspectiva ausubeliana, a inteligência é muito mais afectada pela experiência de aprendizagem do que se pensava há alguns anos, dependendo muito da quantidade e qualidade do material anteriormente apreendido de um modo significativo. A inteligência é, precisamente, a capacidade de relacionar as novas informações com conceitos já disponíveis na estrutura cognitiva. É com ela que apreendemos o significado acerca das novas informações, e revela-se através do modo como construímos esses novos significados.

Novak afirma que, de certo modo, todos somos «estúpidos» em certos domínios de aprendizagem, e «inteligentes» noutros (Novak, 1992, p. 4.22).

Quando, por fraca familiarização com uma área de conhecimentos, dispomos de poucos conceitos em condições de integrarem a nova informação, ou, o que é ainda mais grave, os conceitos de que dispomos estão estruturados de modo incorrecto do ponto de vista científico, não estamos em condições de aprender significativamente os novos conteúdos dessa área de conhecimento com que contactamos. Mantemo-nos agarrados a concepções alternativas, sendo incapazes de mudar conceptualmente.

Pelo contrário, se através de um esforço intencionalmente desenvolvido no sentido de apreender significativamente um material potencialmente significativo, se com boas experiências de aprendizagem nos formos familiarizando com uma área de conhecimento, se dispusermos de uma rede de conceitos dessa área bem diferenciados e integrados, o que se revela pela atribuição de significados correctos a uma vasta gama de conceitos que a ela dizem respeito, estamos em condições de

muito mais «inteligentemente» assimilar uma nova informação potencialmente significativa, pois mais facilmente integramos de modo correcto os novos conceitos dentro da rede conceptual de que já dispomos. É o velho chavão «**riqueza faz riqueza**» aplicado à inteligência.

Tendo, então, em conta esta visão psicológica que se integra num paradigma construtivista, podemos afirmar que o funcionamento da mente é muito dependente da quantidade e da qualidade das experiências de aprendizagem significativamente relevantes em que participámos, portanto do nosso presente e passado cognitivo. De acordo com ela, o funcionamento da nossa mente não está dissociado dos nossos sentimentos, pensamentos e acções, agora e no passado. Estes aspectos combinam-se em cada ser humano para que ele vá, de um modo pessoal, construindo e reconstruindo os seus próprios significados acerca da experiência que vai vivendo, e evoluindo conceptualmente mais ou menos ao encontro das representações cientificamente aceites acerca dessa experiência vivida.

À luz desta perspectiva psicológica que temos vindo a analisar, algumas causas das concepções alternativas e da sua manutenção serão as seguintes:

- estratégias de ensino incorrectas que não procuram individualizar a aprendizagem, não avaliam e não têm em conta o conhecimento prévio dos alunos e estão desajustadas ao contexto em que o ensino decorre;
- currículos e estratégias que não têm em conta o modo como os conceitos se hierarquisam na estrutura cognitiva dos alunos, como nesta ocorre a diferenciação progressiva e a reconciliação integradora dos conceitos;
- materiais de ensino que não são potencialmente significativos porque:
 - (i) as ideias não são correctas, lúcidas, plausíveis, revelando-se muitas vezes arbitrárias;
 - (ii) as ideias subordinadas não elaboram as ideias principais;
 - (iii) não há destaques, ou se os há, eles não apontam para o conceito principal a discutir;
 - (iv) não há ligações significativas entre as ideias subordinadas e as ideias principais.

De acordo com a visão actual da Psicologia, as concepções alternativas o que são? Erros de estupidez, manifestações de falta de inteligência, revelações de atraso mental, como antigamente eram encarados os erros e as dificuldades de muitos estudantes em disciplinas abstractas, como é a Matemática, e como não pode deixar de ser a Física a partir de certo nível?

A resposta é seguramente não! Muitas das ideias incorrectas dos alunos resultam da não existência de estruturas conceptuais bem organizadas nas suas mentes. As novas ideias só podem ser assimiladas significativamente se se integrarem num quadro conceptual previamente estruturado. Se a estrutura do quadro conceptual prévio tem incoerências do ponto de vista científico, o novo conteúdo é apreendido de modo incorrecto. Por outras palavras: se a rede de conceitos de que o aluno dispõe apresenta insuficiências de interligações ou interligações incorrectas à luz da Ciência, a nova informação pode ser apreendida significativamente (de modo inteligente!), mas os significados extraídos da nova informação serão incorrectos.

Este último aspecto é importante e merece ser realçado: **o aluno pode apreender significativamente determinadas ideias, relacionar, associar de modo inteligente novos conceitos com subsunçores existentes, mas, ao mesmo tempo, o significado atribuído a tais conceitos estar incorrecto.** Quer isto dizer que **o aluno pode aprender «inteligentemente» concepções incorrectas.**

Vejamos um *exemplo* que tem que ver com o conceito de inércia.

Vamos supor, por hipótese, que na estrutura cognitiva de um aluno, que inicia o estudo da Mecânica, o conceito de inércia está associado a um conceito de resistência própria do corpo, a uma espécie de força resistente que o corpo exerce em si próprio, cada vez que uma força exterior tenta alterar a velocidade do corpo. Note-se que esta noção é extremamente fácil de ser estabelecida a partir da experiência do dia a dia.

O próprio Newton tinha uma ideia de certo modo análoga, pois refere-se, nos «*Principia*», a uma “*força de inatividade*” (1990, p. 2). Só que Newton via nessa força não só uma resistência ao acto de passagem ao movimento como uma resistência ao acto de passar ao repouso. E distinguia-a claramente das “*forças imprimidas*” ao corpo, considerando-a apenas em termos de “*inatividade da massa*”, caso contrário, para ser coerente, teria de formalizar a lei fundamental aplicada a um corpo do seguinte modo:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{imprimida} + \vec{F}_{inatividade}}{m}$$

No entanto, o aluno, que, por hipótese, tem a concepção de força de inatividade, e não a distingue das outras forças, acabará por espontanea e mais ou menos inconscientemente inferir a ideia de que, na ausência de forças exercidas num corpo, este acaba por ser travado. O seu raciocínio poder-se-ia traduzir formalmente pela expressão

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{inatividade}}{m}$$

a que corresponde uma aceleração de sentido oposto ao movimento uma vez que a força de inatividade é resistente.

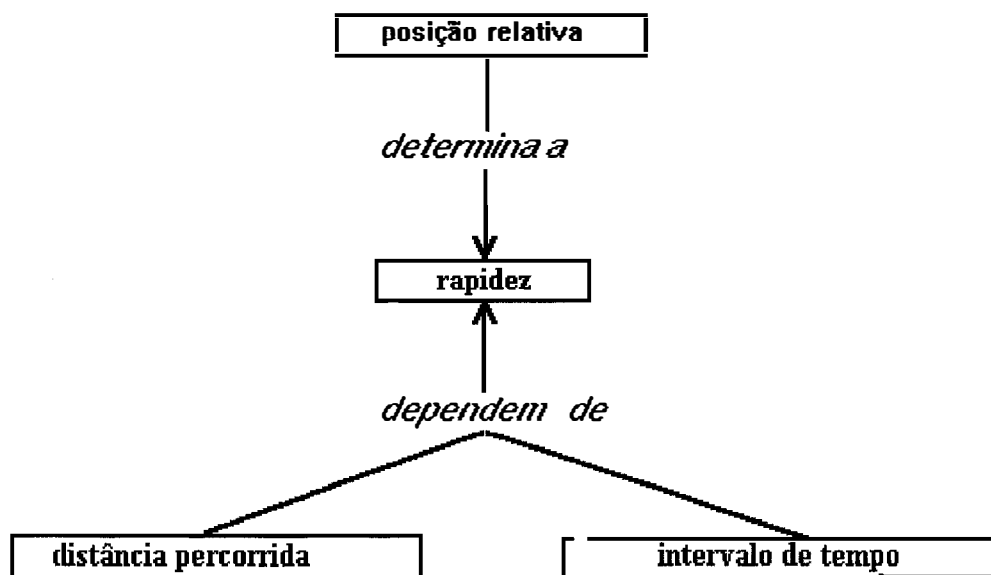
Como vemos o raciocínio do aluno é absolutamente coerente com a ideia alternativa que possui de que, ao deixar de actuar num corpo a força imprimida, o corpo passa a travar por acção de uma força de inatividade. Esta força não actua, mas actuam na grande maioria dos casos forças resistentes dissipativas de que o aluno não se apercebe e que produzem o mesmo efeito.

Perante este exemplo, não será que um ensino da *inércia* que se cinge praticamente à definição de inércia como «*resistência de um corpo à mudança de velocidade*» contribui para uma tal concepção alternativa? Estamos perante uma definição que não é potencialmente significativa só servindo para confundir os alunos.

Ainda um outro *exemplo*:

Piaget, na sua investigação em Psicologia genética, chegou à conclusão de que as crianças têm uma primeira intuição da rapidez, independentemente de toda a duração: é uma intuição baseada na ultrapassagem cinemática (Piaget, 1976, p. 25 e nota 1).

As simultaneidades e durações estão, portanto, em termos psicológicos subordinadas aos efeitos cinemáticos relacionados com a ultrapassagem. Quer isto dizer, em termos ausubelianos, que espontaneamente na mente da criança se estabelece um quadro conceptual que podemos «externalizar» com o seguinte mapa:



Perante uma estrutura cognitiva como esta, é natural que qualquer experiência de aprendizagem envolvendo ultrapassagens acabe por conduzir a associações do tipo



ou seja, afinal, a uma das concepções alternativas dos alunos (4.2.2.1).

Em suma:

A estrutura cognitiva de um aluno depende de factores de diversa ordem incluindo factores psicológicos relacionados com o percurso de aprendizagem a que esse aluno está sujeito. Todo o conteúdo anteriormente apreendido e o modo como foi apreendido determina essa estrutura cognitiva e contribui de um modo decisivo para a existência de concepções alternativas. Estas são, em grande parte, a consequência espontânea de uma experiência primeira, em que os resultados das percepções não foram sujeitos à actividade de um espírito científico reflexivo e crítico, que leva tempo a constituir-se (como também levou tempo a formar-se na história da ciência), mas são também o fruto de experiências de aprendizagem mal conduzidas, consequências de um ensino efectuado em más condições pedagógicas.

Passemos, finalmente, a procurar origens das concepções alternativas dos alunos seguindo uma **via predominantemente sociológica**.

Ao discutirmos o problema da essência do conhecimento, vimos como a construção do conhecimento científico ao longo da história foi sempre influenciada por factores de natureza sociológica. Admitindo o paralelismo com a construção do conhecimento individual, é de esperar que factores semelhantes também o influenciem. O ser humano nasce e vive integrado em pequenas e grandes comunidades, que são decisivas para o modo como constrói as suas representações do mundo. A família, a escola, a turma, o grupo de estudo onde o aluno se integra, toda a cultura que o rodeia, influenciam os seus pensamentos, os seus sentimentos, as suas paixões e as suas acções, que se combinam para a construção dos seus próprios significados para a experiência vivida.

É aqui que podemos discutir os hábitos, as crenças, a linguagem, os pais, os professores, os livros e tantos outros factores de natureza social que interferem na aprendizagem do ser humano.

Comecemos pelas **crenças** e pelos **hábitos**. As crenças e os hábitos traduzem-se muitas vezes no que Toulmin chamou “*nichos culturais*”, dentro dos quais determinadas concepções proliferam, assim como proliferam determinados seres vivos em certos nichos ecológicos (Toulmin, 1972). O ambiente em que um ser humano nasce e vive influencia enormemente as suas representações acerca das novas experiências por que vai passando.

Para exemplificar este facto, iremos relatar aqui um episódio pitoresco que ouvimos contar há cerca de 40 anos a uma pessoa, já então idosa, em Trás-os-Montes. Este episódio ocorreu há mais de 80 anos, quando na maior parte das terras transmontanas ainda não havia luz eléctrica, frigoríficos, rádios e outras regalias que a ciência e a técnica nos proporcionou.

Essa pessoa, residente em Chaves, adquiriu no Porto o primeiro rádio ouvido nessa região transmontana. Como funcionava com grandes válvulas (como todos os rádios daquele tempo) e outros componentes de grandes dimensões, tratava-se de um móvel enorme com mais de 1 metro de altura. Um dia, um aldeão, parente do proprietário do rádio, que jamais tinha visto um móvel a emitir som, foi visitá-lo à cidade. Entrou na sala no momento em que o rádio estava a sintonizar uma estação do Porto emitindo um noticiário. O aldeão, muito espantado, perguntou ao proprietário do rádio quem era a pessoa que estava escondida atrás do móvel a ler as notícias do jornal! Segundo o relato do proprietário do rádio, não foi fácil convencer o aldeão que as notícias que estava a ouvir eram transmitidas do Porto... O aldeão, incrédulo, não-se coibiu de dar uma espreitadela discreta para trás do móvel, não fosse o cidadão estar a brincar à sua custa...

A representação daquele aldeão de Trás-os-Montes acerca daquele objecto era certamente muito diferente da que nós temos hoje. Ele vivia num nicho cultural onde ideias, por mais desajustadas a uma realidade temporal, tinham todas as condições para sobreviver. E, pelos vistos, não só na bela província transmontana.

Na evoluída América há uma comunidade onde os seus membros ainda acreditam que a Terra é plana... (Novak, 1992, p. 3.29).

Passemos agora à **linguagem**, que é outro factor decisivo na formação das representações acerca do mundo. A descrição de um objecto ou de um fenómeno faz-se com signos, incluindo os signos linguísticos. Desde que nasce, a criança vai-se desenvolvendo intelectualmente em grande parte através de uma transmissão cultural baseada em signos linguísticos, tantas vezes usados de modo cientificamente incorrecto.

Quando a criança chega à escola, possui já um léxico muitas vezes cientificamente incorrecto. São múltiplos os exemplos deste facto: trabalho como sinónimo de esforço ou de força, velocidade como sinónimo de rapidez, aceleração como antónimo de diminuição de velocidade, energia como sinónimo de força, força com o significado de velocidade, energia como algo que se usa e gasta, massa como sinónimo de peso, etc. Muitas das concepções alternativas têm aí a sua origem.

Alguém tem dúvidas de que a concepção alternativa «*energia igual a combustível*» está profundamente enraizada na linguagem do dia a dia? E que designações como «calor perdido», «calor ganho», «calor latente» e outras contribuem para a concepção alternativa «*o calor é uma substância armazenada num corpo*»? A própria designação «capacidade calorífica» provém da história da calorimetria no tempo do calórico ou calor-substância e significava a capacidade para armazenar o calórico. Algumas destas designações já não são actuais mas infelizmente continuam a ser adoptadas por professores.

Um outro *exemplo*:

A palavra *massa* significa, em linguagem vulgar, um *pedaço de material*, geralmente pastoso (veja-se a expressão a «massa do pão»). Os alunos trazem para as aulas este significado e, como tal, facilmente enraizam a primeira noção de massa que lhes é apresentada: a noção newtoniana de massa como *quantidade de matéria*. Ora, esta noção é uma das concepções alternativas que os alunos retêm durante mais tempo.

Outra causa das concepções alternativas está nos **livros de ensino**. Mais de 90% dos professores de ciências usam um livro de texto nas suas aulas mais do que 95% do tempo (Harnes e Yager, citado por Renner et al., 1990). Muitos deles praticam mesmo um ensino demasiado centrado no livro.

Ora, conforme veremos na próxima secção, os livros, uns mais outros menos, contêm concepções inaceitáveis do ponto de vista científico. «Errar é humano», e os autores dos manuais de ensino são seres humanos...

4.5 Conclusões a respeito das concepções alternativas dos alunos

A análise que fizemos de inúmeras pesquisas até hoje efectuadas sobre concepções alternativas dos alunos, aliada à nossa experiência de professor e investigador em Didáctica da Física, conduziu-nos a aceitar como válidas as seguintes conclusões:

1ª - Os alunos possuem concepções bastante uniformes acerca dos fenómenos físicos que diferem das representações cientificamente aceites - as suas concepções alternativas.

2ª - Essas concepções têm revelado grande homogeneidade quanto à sua natureza, mostrando-se independentes dos mais diversos factores, como sejam o país de origem, a região, o ambiente escolar e cultural, a idade e o sexo.

3ª - *Antes da aprendizagem de um novo conteúdo científico, o conjunto de procedimentos, vocabulário, associações e analogias entre ideias que o aluno já possui é decisivo para o modo como ele vai apreender esse novo conteúdo. No caso da Física, as ideias que o aluno infere das situações de aprendizagem por que passa, são muito dependentes das suas “teorias pessoais implícitas” (Pozo, 1992, Moreira, 1994), que constituem, por assim dizer, um “modelo de ordem zero”, com o qual a sua mente funciona (Clement, 1982, p. 70).*

4ª - *As concepções alternativas dos alunos resistem à mudança conceptual, persistindo durante anos e anos de aprendizagem formal do conhecimento científico.*

5ª - *As concepções alternativas existem mesmo em alunos que revelam grande facilidade no manuseamento da Matemática. Este manuseamento fácil revelado em testes e outros momentos de avaliação mascaram, por vezes, enormes dificuldades de natureza conceptual.*

6ª - *A natureza do conhecimento científico está na base das concepções alternativas dos alunos. Assim, todos os factores que estão relacionados com essa natureza e que a história da Ciência ajudou a conhecer, influenciam a apreensão do conhecimento científico e, conseqüentemente, estarão na origem das concepções alternativas.*

7ª - *O conhecimento intuitivo, sensorial, as crenças e convicções metafísicas, a não existência de um referencial conceptual claramente estabelecido, as deficiências na aprendizagem anterior, diversos factores psicológicos e sócio-culturais em que incluímos a cultura da comunidade em que o aluno vive e a linguagem, as deficiências dos currícula, das estratégias adoptadas pelos professores e dos materiais que utiliza incluindo os livros, são alguns dos factores mais importantes que estão na origem das concepções alternativas dos alunos.*

8ª - Os alunos tentam sempre compreender os novos acontecimentos através das relações com os conhecimentos que já possuem. Os referenciais interpretativos foram construídos individualmente por cada um. As novas ideias vão depender desses referenciais. Esses referenciais alternativos, mais ou menos intuitivos, revelam uma certa coerência, ainda que os alunos não tenham consciência dessa coerência (Kuiper et al., 1994, p. 290).

9ª - Muitas das concepções alternativas dos alunos encontram, como vimos, paralelismo na história, pelo que o ensino que tem em conta as concepções alternativas dos alunos terá de ser um ensino com conhecimento profundo da evolução histórica das ideias.

10ª - Devido à universalidade das suas características, que lhe retiram todo o carácter ocasional e ad hoc, e ao seu fundamento na própria natureza do conhecimento científico, as concepções alternativas não se confundem com as concepções erradas ou ideias totalmente descabidas que este ou aquele aluno possui.

11ª - As concepções alternativas dos alunos de Física também não devem ser confundidas com dificuldades matemáticas de ordem conceptual ou algorítmica. Assim, por exemplo, as actuais dificuldades que os alunos revelam no cálculo das operações mais elementares, as tradicionais dificuldades na interpretação gráfica de funções, ou a dificuldade em entender o limite de uma razão de infinitésimos da mesma ordem como é a velocidade instantânea nada têm que ver com as concepções alternativas.

4.6 Concepções alternativas dos professores de Física

Ao contrário das concepções alternativas dos alunos, sobre as quais existe um grande número de investigações efectuadas durante mais de uma década, as representações dos professores acerca dos conceitos e dos fenómenos físicos têm sido, comparativamente, pouco pesquisadas. A maioria dos trabalhos que conhecemos são recentes e dizem respeito, principalmente, a professores que ensinam crianças com menos de 10 anos ou a professores em pré-serviço (Kirkwood, Carr e McChesney, 1986, Arzi, White e Fresham, 1987, Kruger e Summers, 1989, Kruger, 1990, Summers, 1990, Rollnick e Rutherford, 1990, Sciarreta et al., 1990, Cachapuz et al., 1991, Webb, 1992, Summers, 1992, Reynoso et al., 1993, Galili, 1993). Na secção 4.6.7 faremos uma síntese das principais concepções alternativas encontradas nos referidos professores, de acordo com os trabalhos de pesquisa de que tomámos conhecimento.

A *School Science Review* (S.S.R.) é uma das mais conhecidas publicações destinadas ao ensino da Ciência. Muitos professores têm encontrado nela os mais diversos artigos de índole didáctica, desde os que sugerem improvisações de material de apoio ao ensino até aos que debatem os conceitos científicos.

Consultámos todos os fascículos da S.S.R., de há mais de 30 anos para cá, à procura de divergências conceptuais acerca dos mais variados tópicos da Física. Acabámos por descobrir interessantes polémicas entre professores sobre alguns conceitos, a que nos iremos referir.

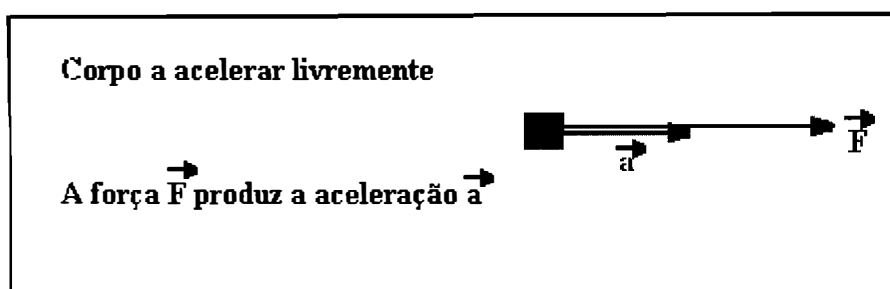
Uma outra prestigiada revista de educação em Ciência é a *International Journal of Science Education* (Int. J. Sci. Educ.). Nela encontrámos também alguns artigos úteis para este trabalho.

A excelente revista *Physics Teacher* (Phy. Teach.), publicada pela American Association of Physics Teachers, também nos proporcionou alguns artigos de índole crítica acerca dos conceitos físicos que transparecem em livros adoptados no ensino da Física.

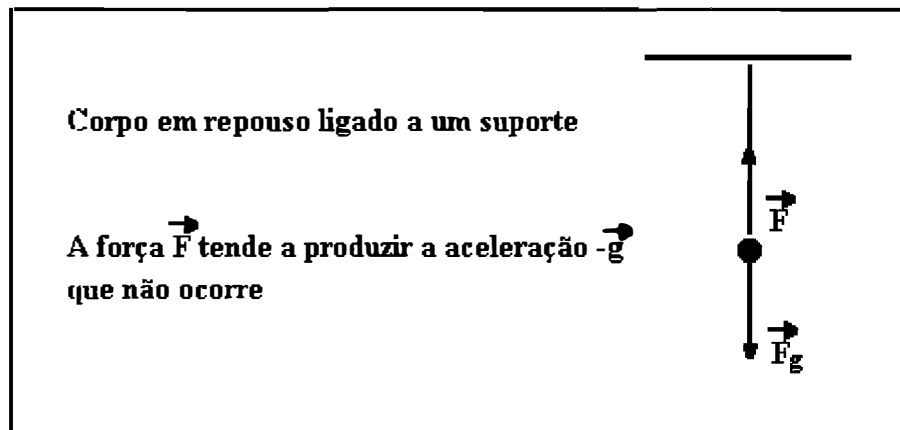
Foi com base na consulta de diversos artigos das referidas publicações, na pesquisa que fizemos com professores portugueses (sobre a qual apresentámos duas comunicações e publicámos um artigo que se reproduz no Apêndice 1), e na análise de diversas obras didácticas de Física, que pudemos não só comprovar a existência de concepções alternativas nos professores de Física, como também indagar acerca da sua natureza e origem.

4.6.1 Concepções alternativas envolvendo o conceito de força

Em 1967, a S.S.R. publicou um artigo intitulado «Uma Nova Definição de Força» (Helsdon, 1967, pp. 544-548). Nesse artigo, o autor começa por referir a incompatibilidade entre duas “*definições de força*”. Uma delas baseia-se na *situação dinâmica* em que um corpo adquire uma aceleração. A força é **o que produz a aceleração do corpo**, e é dada pelo produto da massa pela aceleração.



A outra definição baseia-se numa *situação estática* em que um corpo está em repouso relativamente a outro. Nenhuma das forças do par acção-reacção que actuam nos corpos produz qualquer aceleração. A força passa a ser *o que tende a produzir a aceleração do corpo*.

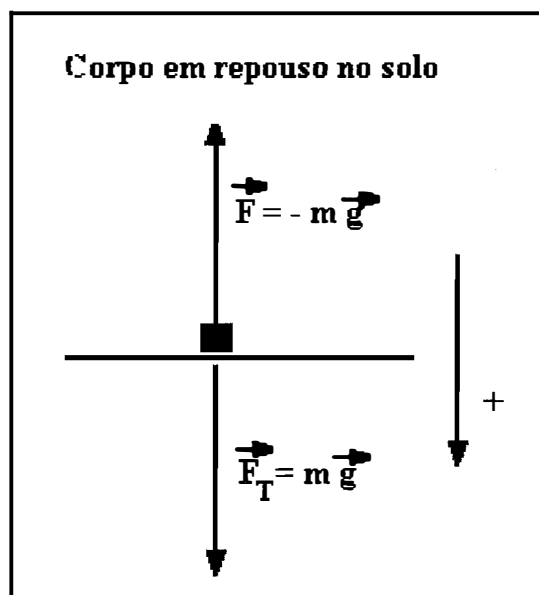


As duas definições poderão ser englobadas numa só: **força é o que produz ou tende a produzir uma aceleração**. “A fraqueza desta definição está na palavra *tende*. A única evidência de que existe a tendência para um corpo acelerar é que essa aceleração ocorra” (Helsdon, 1967, p. 544). «Ver para crer...» é a ideia do autor.

Helsdon propõe, então, esta outra definição para a grandeza força:

“A força que actua num corpo é igual ao produto da massa m do corpo pela sua aceleração relativamente à queda livre, onde a queda livre do corpo será o seu movimento se não estiver em contacto com outros corpos (sólidos, líquidos ou gasosos)” (Ibidem, p. 545).

Esta definição de força é depois utilizada pelo autor em vários exemplos. Começa por considerar o caso de um corpo em repouso no solo.



Em queda livre, o corpo e a Terra teriam acelerações opostas.

Com base na conhecida definição (de Mach) da grandeza massa, Helsdon escreve

$$\frac{m}{m_T} = \frac{a_T}{g}$$

sendo m e m_T as massas do corpo e da Terra, g o valor da aceleração de queda livre do corpo, e a_T o valor da aceleração de queda livre da Terra.

Considerando como positivo o sentido do corpo para a Terra, tem-se:

- aceleração do corpo em relação à queda livre: $-\vec{g}$
- aceleração da Terra em relação à queda livre: $\frac{m}{m_T} \vec{g}$

Aplicando a sua definição de força a cada corpo, Helsdon obtém, então,

$$\vec{F}_{\text{corpo}} = -m\vec{g}$$

$$\vec{F}_{\text{Terra}} = m_T \frac{m}{m_T} \vec{g} = m\vec{g}$$

As forças no corpo e na Terra resultam simétricas de acordo com a lei da acção-reacção.

As conclusões obtidas até aqui nada têm de novo. Elas coincidem com as que se obtêm com a descrição newtoniana da mesma situação. Mas, como vamos ver a seguir, há várias diferenças importantes, uma das quais tem a ver com a força gravítica.

De acordo com a concepção newtoniana de força, o corpo assente no solo está sujeito à força gravítica, sendo ela que equilibra a força de reacção, impedindo o corpo de acelerar para cima.

E o que determina esta concepção alternativa a respeito da força gravítica?

“Uma estranha consequência desta definição de força é que a força da gravidade desaparece, e a única força exercida pela Terra num corpo em repouso à sua superfície tem um sentido para cima” (Ibidem, p. 548).

Notemos que, quando um corpo está em queda livre no vácuo, a sua aceleração em relação à queda livre é zero; então, de acordo com a definição de força de Helsdon, a força que actua no corpo é nula. Assim sendo, quando um astronauta está a gravitar, num satélite, à volta da Terra, ele não está actuado por qualquer força.

“A ausência de força centrífuga e de força gravítica nos corpos existentes num satélite artificial é confirmada pela experiência daqueles que viajaram neles e pelo facto de ninguém jamais ter criado ou sugerido um método de detectar essas forças” (Helsdon, 1967, p. 547).

Esta teoria alternativa é mais uma das que ambicionam libertar-se da acção à distância da Física newtoniana, que o próprio Newton considerava enigmática (ver nota 5). Com efeito, esta teoria cinge as forças a interacções entre corpos em contacto, e mede-as com balanças de molas. *“Forças que não podem ser medidas com balanças de molas não existem”* (Helsdon, 1967, pp. 546 e 548). As acções à distância também deixam de existir no Electromagnetismo. Se, por exemplo, um pólo Norte de um íman está a ser atraído livremente (sem resistências) para o pólo Sul de um solenóide, está em queda livre. Então não há qualquer força a actuar no íman.

Não é difícil concluir como o operacionalismo filosófico está por trás desta concepção alternativa: o que não se mede, não é; o que não se sente, não existe. *“Uma força só surge quando a aceleração de um corpo é total ou parcialmente contrariada por outro”* (Ibidem, p. 548).

Reflectindo sobre esta concepção de Helsdon, construímos o quadro seguinte para comparar este referencial conceptual alternativo com o da Mecânica newtoniana:

Mecânica newtoniana	Teoria alternativa
O estado natural de um corpo é o de repouso ou movimento rectilíneo uniforme.	O estado natural de um corpo é o de queda livre.
Um corpo continua no estado natural a menos que seja forçado a modificar esse estado por uma força nele aplicada.	Um corpo continua no estado natural a menos que seja forçado a modificar esse estado por uma força nele aplicada.
A força num corpo é igual ao produto da sua massa pela sua aceleração em relação ao estado natural.	A força num corpo é igual ao produto da sua massa pela sua aceleração em relação ao estado natural.
A acção de um corpo sobre outro corresponde uma reacção simétrica deste sobre aquele.	A acção de um corpo sobre outro corresponde uma reacção simétrica deste sobre aquele.

Como vemos, há um paralelismo total, apenas diferindo o estado natural de um corpo, isto é, o estado do corpo na ausência de forças.

Recorrendo à sua teoria alternativa, Helsdon abordou alguns problemas mecânicos com os mesmos resultados que a teoria newtoniana, tirando partido de uma definição bastante artificial e ambígua de aceleração em relação à queda livre (10).

Era de esperar que esta concepção fosse alvo de críticas negativas bem fundamentadas por parte dos leitores da S.S.R. Afinal não constitui ela uma autêntica “*heresia*” (Gardner, 1968, p. 932)?

Mas tal não aconteceu. Os professores que criticaram o artigo na S.S.R. revelaram mais perplexidade do que bons argumentos para rebater o seu conteúdo.

Analisemos alguns dos melhores comentários que apareceram nos números seguintes da revista:

- *Se a atracção gravitacional de um astro sobre um satélite desaparece, como poderemos calcular o período e a velocidade orbital deste?* (Parry, 1967, p. 269).
- *Não havendo força gravítica na queda livre, como explicar a energia cinética cá em baixo quando um corpo cai?*

Estas dúvidas pressupõem uma pergunta mais geral, que é esta: *como tratar todos os problemas que se relacionam com a gravitação sem a força da gravidade?*

A respeito desta questão, é importante termos em conta que é possível abordar os mesmos problemas da gravitação na base de formalismos completamente distintos da teoria newtoniana. É o que sucede na Teoria da Relatividade Geral em que a queda de um corpo para a Terra resulta da curvatura do espaço-tempo devido à presença da massa da Terra.

- *Como designar então a influência que nos impede de voar para fora da Terra, que faz com que os satélites girem em volta da Terra e um íman seja atraído para outro?* (Colbeck, 1967, p. 269).

No espírito de quem faz esta pergunta está a ideia de força como causa, patente na conhecida definição: *«força é a causa da alteração do estado de repouso ou de movimento de um corpo ou da sua deformação»*.

Este sentido causal é hoje posto em causa, como vimos no capítulo anterior. A Física não procura causas. Procura descrições baseadas em referenciais conceptuais. Muda o referencial, muda a descrição.

Quando um satélite gravita, o que observamos é a aceleração do satélite e as consequências daí resultantes para os passageiros do satélite. A teoria de Newton oferece-nos um quadro conceptual em que uma tal aceleração e os fenómenos que dela resultam são descritos com base no conceito de força, definida como a taxa de variação temporal da quantidade de movimento. Nada impede, em princípio, que se construa um outro quadro conceptual em que esses fenómenos sejam descritos sem recorrermos ao conceito de força. Esse novo quadro conceptual, se explicar de modo coerente e simples os fenómenos de gravitação, será tão ou mais aceitável como o quadro newtoniano.

Não é, portanto, por dispensar uma grandeza de conotação causal como a força de atracção newtoniana que uma teoria se torna inaceitável. Do mesmo modo que, para Aristóteles e mais tarde para Galileu um astro se move circularmente em torno do Sol sem que para tal seja necessária qualquer força - é a consequência da natureza do próprio astro (Aristóteles) ou de um ímpeto circular que lhe foi comunicado (Galileu) - para Heldson o movimento de um astro é naturalmente elíptico. Move-se desse modo, sem forças exteriores, tal como um corpo se move em linha recta sem forças exteriores segundo a Física newtoniana.

- *Conhecemos as forças por experiência e percepção, não por definição* (Armstrong, 1967, p. 271).

Esta outra crítica afigura-se-nos ainda mais ingénua. As forças de que temos experiência e percepção são, precisamente, aquelas cuja existência esta teoria alternativa admite. Que experiência ou percepção tem um astronauta que viaja numa pequena nave a respeito da força gravítica, se não dispuser de um referencial exterior em relação ao qual define o seu estado cinético?

Nós próprios, fixos na Terra, não sentimos nem medimos rigorosamente a atracção da Terra quando julgamos que estamos a sentir e a medir o peso, em virtude de a Terra não ser rigorosamente um referencial de inércia.

Por outro lado, certas forças de contacto de que a Física não prescinde (a força de reacção exercida num corpo pelo suporte onde ele assenta, por exemplo) são tão difíceis de perceber que uma grande maioria dos alunos de Física, mesmo com vários anos de estudo dessa ciência, se esquecem muitas vezes delas, como já referimos.

Finalmente a percepção das forças «mais percepcionáveis», as de contacto, é enganadora, e *não resolve o problema da acção instantânea a distância*. As forças de contacto, que tão facilmente percepcionamos, resultam, no fundo, de interacções entre partículas que se situam à distância umas das outras (ainda que microscópica). Por tudo isto, cremos que a aceitação de uma força com base na percepção é mais que criticável.

Se a percepção de um fenómeno físico concreto, como a emissão de um som, acarreta problemas do foro psicológico e fisiológico, a percepção da «força», um conceito abstracto, uma construção da Ciência, é altamente problemática. Portanto a afirmação de que conhecemos as forças por percepção não é aceitável.

- *A definição de queda livre em que assenta a teoria alternativa proposta é confusa* (Colbeck, 1967, p. 269).

Das críticas à definição de Helsdon de que tomámos conhecimento, esta é a única que se nos afigura com fundamento. Quando duas ou mais teorias surgem em alternativa devido ao carácter axiomático inerente aos modelos científicos e quando essas teorias resistem ao veredicto da experiência, um critério válido para nos decidirmos a favor de uma delas é o critério de coerência e simplicidade lógica. Ao contrário da concepção newtoniana de força, que de modo simples e transparente, se tem revelado em excelente acordo com inúmeros fenómenos, a concepção de força proposta só se põe de acordo com a experiência se recorrermos a uma definição ambígua de “*aceleração em relação à queda livre*”. Na direcção vertical, a “*aceleração em relação à queda livre*” que Helsdon utiliza entende-se perfeitamente: é a aceleração relativa a um referencial físico em queda livre, calculado com a relatividade de Galileu. Porém, na direcção horizontal, a “*aceleração em relação à queda livre*” já diz respeito a um referencial em repouso na Terra, portanto não em queda livre! Helsdon serve-se, assim, de referenciais completamente distintos para determinar essa estranha aceleração.

Em suma:

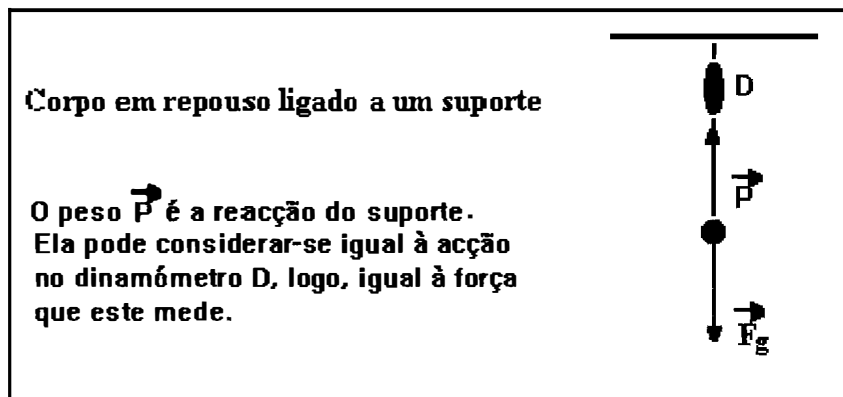
Admitindo que esta concepção alternativa fosse desenvolvida de modo a adaptar-se aos resultados experimentais pelo menos tão bem como a de Newton, ela seria certamente muito mais complexa. Além disso prova-se que tem contradições internas, a começar pela própria natureza das forças de contacto entre os corpos... que não são mais do que o resultado de acções que ocorrem sem contacto entre as suas partículas. Este referencial alternativo não resolve o problema da acção a distância. Então nada justifica abdicar de um formalismo que tanto sucesso tem tido, em favor de outro mais complexo, enquanto não se provar que este se adapta melhor à experiência do que o primeiro.

4.6.2 Concepções alternativas envolvendo o conceito de peso

1. A polémica entre professores acerca do conceito de peso

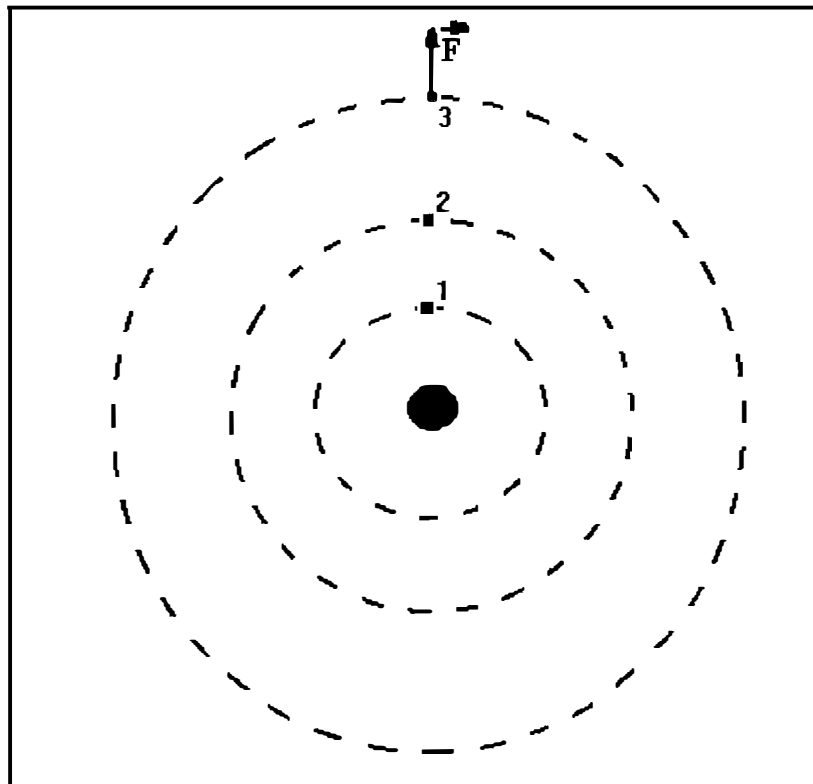
Em 1965, o professor inglês Macleod fez uma crítica à definição tradicional de *peso* como *força atractiva da Terra* e propôs o que ele designou por uma “*definição sensível de peso*”, que tem por base a nossa experiência de “*ter peso*” (1965, pp. 372-377).

A crítica de Macleod à definição tradicional baseia-se no facto de nós não sentirmos nem medirmos a força atractiva da Terra quando julgamos estar a sentir e a medir o peso. *O que a balança-dinamómetro mede é a força que se opõe à atracção da Terra. O peso que sentimos é uma força dirigida para cima, precisamente a reacção do suporte onde nos apoiamos. Propõe então que o peso seja considerado a grandeza que sentimos e medimos como tal, ou seja a “reacção do suporte”* (Ibidem, p. 327):



Trata-se de uma definição claramente operacional, que aliás foi apresentada numa época em que o operacionalismo ainda era uma filosofia da Ciência em voga e em que alguns livros de Física importantes adoptavam essa filosofia.

Macleod serve-se de experiências com astronautas para argumentar a favor da sua concepção alternativa. Considera três astronautas: dois deles orbitando a distâncias diferentes da Terra, e um terceiro, mais distante do que os dois primeiros, afastando-se verticalmente para o espaço numa nave actuada por uma *força oposta à atracção da Terra*.



Os dois primeiros astronautas experimentam as mesmas sensações de *imponderabilidade*, ainda que um deles esteja mais atraído para a Terra do que o outro. E, por sua vez, enquanto a *força oposta à atracção da Terra* actuar no terceiro astronauta, ele sente-se com peso, o que não sucede se tal força deixar de actuar, independentemente de o astronauta ainda se afastar algum tempo da Terra. Ao retornar à Terra, o terceiro astronauta continua a sentir-se sem peso até ao momento em que uma nova *força oposta à atracção da Terra* o trava.

Esta concepção acerca do peso evita, segundo o seu autor, que se utilizem “*forças ilegítimas*” (centrífugas e outras) para manter a consistência com a vulgar ideia de peso como força gravítica. E responde, mesmo, a hipotéticas objecções contra a sua concepção, tais como:

- Ela só se aplica em movimentos de queda livre e movimentos acelerados.
- Sentimos, dentro de nós, que o peso é para baixo.

Reagindo à primeira objecção, mostra com exemplos que este novo conceito de peso se aplica também em situações estáticas.

Quanto à segunda crítica, argumenta deste modo: se sentir o peso é sentir as entranhas do nosso corpo a vergarem «*para baixo*», isso corresponde, no espaço, à actuação de uma força «*para cima*» e não «*para baixo*».

Macleod realça que “*aparentemente estamos a viver numa superfície que acelera para cima e que nos confrontamos com o problema de reconciliar este facto com a nossa imagem de uma Terra esférica estável*”. Após esta clara alusão ao princípio de equivalência de Einstein que o autor não refere, ele conclui afirmando que “*inventámos a gravitação e fizemos dela uma teoria com alguns aspectos insatisfatórios*” (Ibidem, p. 377).

Não vamos aqui pormenorizar toda a polémica à volta desta definição de peso que acompanhámos a par e passo. Vamos apenas resumir mais algumas concepções de peso que, em alternativa à de Macleod, vieram a ser propostas:

(i) Clatworthy (1965, pp. 236 a 238) **distingue entre peso e peso resultante** de um corpo.

O **peso**, na vizinhança da Terra, é o **produto da massa, m , do corpo pela aceleração, g , nele produzida exclusivamente pela Terra**, “*considerando ausentes outras acelerações em relação ao centro de gravidade da Terra*”.

Tem-se:

$$P = G \frac{mM}{d^2} = mg$$

sendo G a constante de gravitação universal, M a massa da Terra e d a distância ao centro de gravidade da Terra.

No caso mais geral, em lugar da Terra temos a massa gravitacional predominante.

O **peso resultante** de um corpo é a **força exercida pelo corpo numa balança de mola**, ou a força equivalente a ela (considerando que o corpo não está acelerado relativamente à balança). Obtém-se através de uma soma vectorial em que se considera $G \frac{M}{d^2}$ positivo, as componentes «*para cima*» de outras acelerações também positivas, e as componentes «*para baixo*» dessas acelerações negativas.

Assim, temos, por exemplo:

para objectos em órbita $\rightarrow mg - mv^2/r$

objectos em queda livre $\rightarrow mg - mg$

objectos em elevadores $\rightarrow mg + ma$

Quando os corpos gravitam uns em torno dos outros, estão sem peso resultante uns em relação aos outros.

(ii) H Armstrong (1965, pp. 235 e 236), por sua vez, define operacionalmente o **peso** como a **grandeza que se mede com a pesagem**. E usa, em alternativa, a seguinte abordagem:

1º - **Dispensa a grandeza massa** para evitar o ciclo vicioso resultante de se utilizarem simultaneamente peso e massa, e para evitar a confusão entre essas grandezas.

2º - Considera (tal como Aristóteles, que ele cita) que **há um «movimento natural» e um «movimento forçado»**. Assim, o movimento natural dos objectos na vizinhança da superfície da Terra é para baixo, com uma aceleração fixa: a aceleração da gravidade, g .

3º - Entra em conta com a relação experimental

$$\frac{F}{P} = \frac{a}{g} \Leftrightarrow Fg = Pa$$

sendo a a “*aceleração forçada*” pela força $\vec{F}$ e $\vec{P}$ o peso do corpo.

Armstrong preconiza o uso desta expressão para traduzir a lei fundamental newtoniana da dinâmica, utilizando-a para relacionar a força que actua numa partícula com a respectiva aceleração (note-se que esta relação equivale, no fundo, à relação $F = ma$, uma vez que o quociente P/g é igual à massa).

(iii) Por sua vez, G. Brown (1966, p. 574) defende a vulgar definição de **peso** de um corpo como **força de atracção gravitacional** sobre o corpo (na Terra ou noutro astro),

$$P = G \frac{mM}{d^2} .$$

E realça que o peso **não** é, portanto, o produto da massa pela aceleração da gravidade,

$$P \neq mg .$$

O argumento de Brown é o seguinte:

A fórmula $P = mg$ é uma “*fórmula inercial*” (refere-se, segundo cremos, ao facto de só ser válida em referenciais de inércia). Ora a Terra não é rigorosamente um referencial de inércia e, assim sendo, conjuntamente com a força gravítica actuam as forças de inércia.

Por outro lado, “*os pobres dos alunos não podem compreender porque é que a medida de uma força num corpo em repouso relativamente à Terra depende da medida de uma aceleração (g) que o corpo não possui*” (Ibidem, p. 574).

(iv) Para M. Fodgen (1967, p. 587), o **peso** de um corpo de massa m é a **força** nele exercida pelo campo gravitacional,

$$\vec{P} = m\vec{g}$$

onde a intensidade g deste campo é expressa em newton por quilograma.

Fodgen chama a atenção para que, num grande número de situações próximas da Terra, o valor do campo pode ser obtido com aproximação suficiente pela expressão

$$g = G \frac{M_T}{R_T^2}$$

sendo G a constante de gravitação universal, M_T a massa da Terra, e R_T o raio da Terra. Reconhece, porém, que o peso assim definido não é o que experimentamos nem o que medimos com uma balança de molas.

(v) Uma outra definição de peso foi proposta por Fox (1973, p. 602) e é a seguinte:

Peso de um objecto é a *“força registada por um medidor de forças colocado entre o objecto (que deverá ser livre de se mover) e algum objecto de referência consensualmente adoptado (tal como a Terra ou a Lua ou o chão de uma nave espacial) ou qualquer extensão rígida desse objecto”*.

Trata-se, conforme o seu defensor proclama, de uma definição operacional que quase coincide exactamente com o significado de peso na vida diária.

(vi) Stables (1973, pp. 602 e 603) define **peso** de uma partícula como sendo o *“empurrão que ela exerce num suporte onde se apoia, ou o puxão que exerce num ponto de suspensão, desde que o suporte e o local de suspensão não caiam”*.

E, segundo ele, um corpo não cai desde que não reduza a sua distância à Terra, como é o caso de um satélite em órbita circular à volta da Terra. O peso acaba por ser dado por

$$\vec{P} = m\vec{g}$$

e é medido através da correspondente reacção (igual e oposta).

Nos pólos da Terra, o peso é igual à força gravítica,

$$P_{\text{polos}} = F_g,$$

e no equador é a força que sobra depois de a força centrípeta ser subtraída da atracção gravitacional,

$$P_{\text{equador}} = F_g - m\omega^2 R.$$

Em qualquer ponto da Terra, o peso é a diferença vectorial entre $\vec{F}_g$ e $\vec{F}_c$.

(vii) G.T. Kingsley (1971, pp. 446 e 447) define “*peso de um corpo como a força necessária para impedi-lo de cair num campo gravitacional.*” Portanto, o peso segundo o professor Kingsley é uma força dirigida «para cima».

(viii) A definição de peso de Kingsley é também defendida por D. Williamson (1973, pp. 603 a 605). Para além de considerar o **peso** como uma força dirigida «para cima», este professor concorda com Armstrong que o estudo da Mecânica (particularmente com os alunos jovens) deve ser efectuado apenas com o peso dos corpos (e não com a massa).

O falar ao mesmo tempo na massa e no peso só confunde os alunos. Kingsley refere, a título de exemplo, a confusão que resulta de se afirmar que “*a balança de travessão mede a massa e a balança de mola mede o peso*”. Segundo recomenda esse professor, em vez de afirmarmos que um corpo tem a massa de 3 kg é preferível dizermos que ele tem o peso de 3 kgf . A balança, qualquer que seja, dá-nos o peso em quilogramas-força. Os alunos, habituados a ouvirem dizer vulgarmente que um corpo pesa 2 kg, e ao ouvirem o professor afirmar que a massa é 2 kg, ficam com a ideia errada de que a massa é o nome científico que o professor usa para se referir ao peso. Massa e peso são, para os alunos, a mesma coisa, sendo apenas uma questão de linguagem.

(ix) O professor Cox (1979, p. 591) define **peso** de um corpo como sendo a “*grandeza expressa em newtons que indica quão pesado o corpo é*”. Por sua vez, a **massa** de um corpo não é mais do que a “**medida do número de partículas**” que nele existem.

(x) Finalmente, Allen King defende no «*American Journal of Physics*» (1962) a seguinte definição: **peso** de um corpo é a “*força exercida pelo corpo num suporte*”.

Como veremos a seguir, esta e as outras definições são adoptadas pelos mais diversos autores de livros de Física.

2. Concepções alternativas sobre o peso existentes nos livros de Física

Passámos em revista o modo como várias edições recentes de manuais de Física concebem o peso de um corpo. Depois de analisados todos esses manuais, concluímos que era possível distinguir 5 concepções diferentes. A tabela da página 391 mostra quais são essas concepções e quantas e quais são as obras consultadas que as adoptam. Entre elas encontram-se também manuais para o ensino adoptados em Portugal identificados por um código (ver secção 1.7).

Muitos desses livros consultados distinguem entre **peso** de um corpo e **peso aparente** do corpo (Tipler, 1976, p. 89, Cutnell e Johnson, 1989, p. 104, Gettys et al., 1989, p. 113, Benson, 1991, p. 92, Blatt, 1992, p. 61). Consideram, em geral, o **peso** do corpo como a força exercida pelo campo gravitacional sobre ele e/ou a força que produz a aceleração da gravidade. E chamam **peso aparente** do corpo à força exercida pelo corpo no suporte a que está ligado e, portanto, a força que o dinamómetro mede.

Enquanto que o peso é apresentado de modo conceptual, através de uma definição que envolve a aceleração da gravidade ou o campo gravítico, o peso aparente é apresentado quase sempre de uma forma operacional, recorrendo a corpos suspensos em elevadores, a corpos em foguetões, e a outros exemplos.

Cutnell e Johnson, por exemplo, contrapõem explicitamente o «*peso verdadeiro*» de um corpo, que identificam com a força gravítica que actua no corpo, ao «*peso aparente*», o peso medido com dinamómetros (1989, p. 104 e 105).

Quer dizer: o peso que nós facilmente medimos é aparente e o peso que nós não medimos é o verdadeiro!

Já tivemos oportunidade de nos insurgirmos contra esta classificação de grandezas em verdadeiras e aparentes, pois tal separação não tem fundamento filosófico.

Na grande maioria das obras que consultámos, o peso aparente é dirigido para baixo, mas há autores que consideram esse peso dirigido para cima. Por exemplo, Tipler define o peso aparente como a *“força que equilibra o nosso peso”* (1976, p. 89) e Benson perfilha a mesma ideia (1991, pp. 92 e 93).

Há autores que, ao analisarem a situação de **imponderabilidade**, afirmam que, no referencial a que o corpo está ligado, *“o peso é aparentemente zero”* porque a atracção da gravidade é aparentemente zero (Ohanian, 1994, p. 95). Outros afirmam que *“o corpo está aparentemente sem peso, mas o peso (verdadeiro) não é zero”* (Benson, 1991, p. 93).

O professor Nussenzveig (1995, p. 105) distingue entre força-peso e peso.

A força-peso é a força que é devida à atracção gravitacional da Terra.

O peso é a *“grandeza da força (vertical, dirigida para cima) que é preciso aplicar ao corpo para o manter em equilíbrio quando suspenso livremente”*.

Vemos, assim, que há as mais diversas ideias acerca da grandeza peso e que esta grandeza é uma das mais polémicas grandezas físicas. Há mesmo quem advogue que devíamos abandonar o uso do substantivo peso, em Física (Jones, 1973, p. 418).

De facto, a menos que se consiga respeitar uma definição uniforme e internacionalmente consagrada (e essa definição existe), é preferível mesmo falar em força gravítica, nos referenciais inerciais, ou em resultante da força gravítica com as forças de inércia que intervêm, nos referenciais acelerados, do que falar em peso.

Adiante privilegiaremos uma definição de peso que nos parece a mais susceptível de vir a ser consensualmente adoptada, por motivos que então apresentaremos (secção 4.7.5).

Concepção de peso	Obras consultadas que a adoptam
Força gravitacional, força da gravidade, ou força atractiva da Terra, $\vec{P} = m\vec{g}$, onde $\vec{g}$ representa o vector campo gravítico terrestre.	• Ohanian, 1994, p. 94; • Fishbane et al., 1993, pp. 126, 127 • Young, 1992, p. 94; • Blatt, 1992, p. 55; • Serway, 1992, p. 103; • Benson, 1991, p. 84 e 85; • Gettys, Keller e Skove, 1989, p. 89; • Cutnell e Johnson, 1989, p. 81; • Tipler, 1976, p. 83; • Martindale et al., 1992, p. 105; • Manuais portugueses: I, p. 70; II, p. 212; III, p. 51;
Força responsável pela aceleração da gravidade, $\vec{g}$, com que o corpo cai para a Terra (a aceleração da gravidade, g , não tem exactamente o mesmo valor numérico do campo gravítico terrestre, devido ao movimento de rotação da Terra, mas a diferença entre ambos não é considerada).	• Tipler, 1976, p.88; • Young, 1992, p. 94; • Fishbane et al., pp. 126,127; • Blatt, 1992, p. 55 • Manuais portugueses: IV, p. 111
Força igual ao produto da massa pela aceleração com que o corpo cai livremente no referencial da pessoa que mede o peso.	• Keller, Gettys e Skove, 1993, p. 99
Acção ou força aplicada no suporte ao qual o corpo está ligado (está, pois, aplicada, fora do corpo).	• Orear, 1971, pp. 78, 79.
Força que actua no corpo equivalente à acção no suporte.	• Manual português X, p. 230

4.6.3 Concepções alternativas acerca das leis de Newton do movimento:

As três leis básicas em que assentou a construção do conhecimento acerca dos movimentos foram enunciadas por Newton nos seguintes termos (Newton, 1990, pp. 15 e 16):

1ª lei - *“Todo o corpo permanece no seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha recta, a menos que seja obrigado a mudar esse estado por forças imprimidas nele.”*

2ª lei - *“A variação de movimento é proporcional à força motora imprimida e é produzida ao longo da linha recta na qual aquela força é imprimida.”*

3ª lei - *“A toda a acção opõe-se sempre uma reacção igual, ou, as acções mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas em sentidos opostos.”*

A respeito da interpretação do significado destas três leis temos verificado a existência de divergências em livros de texto de Física. Tendo em conta a interpretação que a seguir fundamentaremos como correcta, somos levados a referir as três concepções alternativas seguintes que alguns professores possuem a propósito do significado das três leis de Newton:

1ª - O primeiro e o segundo enunciados de Newton são definições e não leis.

2ª - O segundo enunciado é um caso particular do primeiro.

3ª - A terceira lei é válida entre quaisquer partículas que interagem entre si.

Vamos, então, mostrar que se trata de interpretações inaceitáveis.

Comecemos naturalmente pela primeira. A ideia traduzida no primeiro enunciado de Newton é a seguinte: *um corpo que não esteja actuado por forças (ou, o que é equivalente, actuado por forças que se equilibram) está em repouso ou em movimento rectilíneo e uniforme (m.r.u.).*

Todavia, esta ideia contém desde logo uma insuficiência: *o corpo está em repouso ou em m.r.u. em relação a que referencial?*

Sem a introdução de um referencial relativamente ao qual é válido o conteúdo do primeiro enunciado newtoniano, ele carece de sentido. Torna-se, pois, necessário completar esse primeiro enunciado especificando o referencial ou referenciais em que ele é válido.

Newton sentiu este problema e, por isso, criou a ideia de um *espaço absoluto* (extrínseco a qualquer corpo do Universo) ligado a um *referencial euclideano tridimensional em repouso absoluto*. Toda a Física Clássica privilegiou este referencial onde a lei da inércia era considerada absolutamente válida. Essa ideia de um referencial em repouso absoluto foi ainda mais brilhante quanto é certo que, pelo princípio da relatividade de Galileu, a lei da inércia passaria a ser também absolutamente válida em qualquer referencial que se pudesse considerar em translação uniforme no espaço absoluto.

Com a Teoria da Relatividade Restrita a situação alterou-se radicalmente, pois as ideias newtonianas de espaço absoluto, repouso absoluto e movimento absoluto tiveram de ser abandonadas.

Actualmente, entre a infinidade de referenciais que podemos definir no Universo para o estudo dos movimentos, somos forçados a **postular** pragmaticamente a existência de referenciais ligados a partículas consideradas livres relativamente aos quais a lei da inércia é válida. Chamamos-lhes *referenciais de inércia*. A experiência mostra que há, de facto, referenciais que se comportam como sendo de inércia em relação a determinados fenómenos. De certo modo, Newton já tinha postulado a sua existência ao considerar um referencial ligado ao Sol e com três eixos passando por três estrelas fixas.

Podemos então enunciar a lei da inércia do seguinte modo:

«Todo o corpo não actuado por forças está em repouso ou em movimento rectilíneo uniforme relativamente a determinados referenciais chamados referenciais de inércia».

Acabámos deste modo com uma insuficiência mas caímos, por outro lado, num ciclo vicioso.

Com efeito, como definimos, então, um referencial de inércia? É, por definição, um referencial onde um corpo não actuado por forças tem movimento rectilíneo uniforme. Mas, como sabemos que um corpo não foi actuado por forças?

O próprio Newton deu a resposta ao definir a *força imprimida* num corpo. Segundo ele a força imprimida num corpo é “*uma acção exercida no corpo com o fim de alterar o seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha recta*” (Newton, 1990. p. 3).

Quer dizer: só sabemos que um corpo não foi actuado por forças (ausência de forças imprimidas nele) se observarmos que ele não mudou o seu estado de repouso ou de movimento rectilíneo e uniforme em linha recta em relação aos referenciais de inércia.

Em resumo:

Definimos referenciais de inércia a partir do estado cinético dos corpos na ausência de forças. Mas, para falarmos na ausência de forças, temos de partir da existência prévia de referenciais de inércia.

Não admira, portanto, o comentário que um dia Sir Arthur Eddington fez a propósito da 1ª lei de Newton (Anderson, 1990, p. 1192): “*tudo o que a primeira lei estabelece é que toda a partícula continua no seu estado de repouso ou movimento uniforme em linha recta, excepto se não se encontrar nesse estado.*”

Concluimos, assim que **a 1ª lei de Newton não define coisa alguma**, sendo absolutamente necessário postular-se a existência de referenciais de inércia.

Quanto à 2ª lei, ela foi traduzida por Newton em termos de movimento e força motora imprimida, como vimos atrás. Newton usou neste enunciado a palavra movimento como sinónimo de quantidade de movimento (ou momento linear), o que ele fazia muitas vezes. Por outro lado, a designação força imprimida correspondia, em Newton, não ao que hoje chamamos força mas ao que actualmente designamos por impulso (McClelland, 1993, p. 100). Aliás chegamos facilmente a esta conclusão lendo o breve texto de Newton que se segue ao enunciado da 2ª lei onde ele afirma que *“se qualquer força gera um movimento, uma força dupla gera um movimento duplo ...”* (Newton, 1990, p. 16).

Traduzindo, então, em termos formais e actuais a segunda lei de Newton, podemos afirmar que uma variação elementar do momento linear é proporcional ao impulso elementar que nele actua, e escrever

$$d\vec{p} = k \cdot \vec{F} \cdot dt$$

Escolhendo convenientemente as unidades de modo a que a constante de proporcionalidade k seja igual a 1, podemos atingir a expressão equivalente

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Ora, acontece que a única definição rigorosa de força que poderemos usar é

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (\text{Alonso e Finn, 1977, pp. 154 e 156})$$

Parece assim, à primeira vista, que a segunda lei não é mais do que a definição de força. Vamos ver que tal não é o caso.

Num dado instante, a força aplicada numa partícula, $\vec{F}_1$, é, nos referenciais inerciais, um modo de exprimir a interacção da partícula com outra. Essa interacção traduz-se numa taxa temporal de variação do momento linear,

$$\vec{F}_1 = \frac{d\vec{p}_1}{dt}$$

Se, no mesmo instante, actuasse outra força, $\vec{F}_2$, em vez de $\vec{F}_1$, ter-se-ia que essa outra interacção corresponderia a outra taxa de variação do momento linear diferente, tal que

$$\vec{F}_2 = \frac{d\vec{p}_2}{dt}$$

Agora levanta-se o seguinte problema:

E se as duas forças actuarem simultaneamente? Será que podemos somar as duas expressões anteriores membro a membro e escrever

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \frac{d(\vec{p}_1 + \vec{p}_2)}{dt} \quad \Leftrightarrow \quad \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

concluindo, assim, que a força resultante é igual à taxa temporal do momento linear resultante?

Esta soma não tem qualquer legitimidade lógica. A sua legitimidade provém do facto de se postular o *princípio da independência das forças de Galileu*. Este princípio está, pois, subjacente à 2ª lei de Newton e faz com que esta lei esteja muito para além de uma simples definição de força.

A idênticas conclusões chegamos se recorrermos a considerações geométricas sobre o espaço-tempo newtoniano, a exemplo do que se faz na Teoria da Relatividade Restrita. A primeira lei surge-nos, então, como um enunciado que postula a existência de um conjunto de linhas rectas no espaço-tempo newtoniano, enquanto que a segunda lei indica o modo como o ambiente de uma partícula afecta o seu percurso nesse espaço- tempo (11).

Em suma:

A primeira e segunda leis de Newton ou leis básicas da dinâmica são afirmações assentes numa ampla gama de experiências até hoje efectuadas. Não foram obtidas exclusivamente na base de manipulações lógicas, e são muito mais do que meras definições.

Vamos agora passar a criticar a terceira lei ou lei da acção-reacção, e as principais dificuldades que se levantam à sua aplicação a nível do ensino.

Quando Newton enunciou a lei da acção-reacção, passou logo a comentá-la e um dos exemplos que utilizou é o célebre exemplo do «cavalo que puxa uma pedra amarrada a uma corda» (1990, p. 16). Ao analisar este exemplo, afirma a determinada altura que a corda *“puxará o cavalo, na direcção da pedra, tanto quanto ela puxa a pedra na direcção do cavalo, e obstruirá o progresso de um tanto quanto promove o do outro”*.

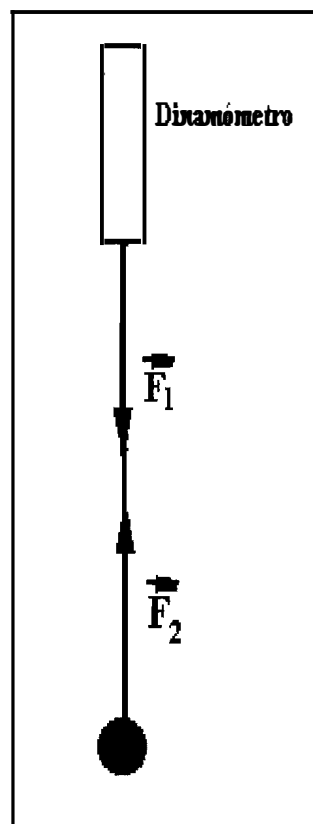
Ora, esta afirmação só é verdadeira a velocidade constante (ou se desprezarmos a massa da corda).

Do mesmo modo que nos «*Principia*» de Newton, também nos livros de Física se vê muitas vezes a utilização da lei da acção-reacção entre corpos que interferem através de um terceiro corpo, como no exemplo a seguir:

As forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ que são exercidas em dois corpos, o dinamómetro e a esfera, por um terceiro corpo, a corda, **não constituem um par acção-reacção.**

À acção $\vec{F}_1$ exercida pela corda no dinamómetro corresponde uma reacção $-\vec{F}_1$ (não representada) que o dinamómetro exerce **na corda** para cima.

À acção $\vec{F}_2$ exercida pela corda na esfera corresponde uma reacção $-\vec{F}_2$ (não representada) que a esfera exerce **na corda** para baixo.



Estas forças $-\vec{F}_1$ e $-\vec{F}_2$ que actuam **na corda** não são em geral iguais, dependendo a sua diferença da força gravítica que actua na corda e da aceleração com que esta se move.

Portanto, as forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$, que actuam no dinamómetro e na esfera, não têm geralmente a mesma medida e não podem ser consideradas um par acção-reacção.

A seguir ao exemplo do cavalo que arrasta a pedra, Newton passa a relacionar os impulsos que actuam entre dois corpos que interactuam, afirmando a determinado momento que *“as mudanças feitas por essas acções são iguais não nas velocidades mas nos movimentos dos corpos (...)”*

Pois, porque os movimentos são igualmente alterados, as mudanças de velocidades feitas em direcções a partes contrárias são inversamente proporcionais aos corpos”.

Tendo em conta que Newton usava a palavra «corpo» com o sinónimo de *massa* do corpo e a palavra «movimento» como significando a *quantidade de movimento* ou *momento linear*, concluímos que ele interpretou a lei em termos dinâmicos. Em termos actuais, a primeira parte da frase anteriormente transcrita traduz a ideia de que, na interacção de duas partículas, desenvolvem-se impulsos iguais (as «acções»), os quais desencadeiam alterações opostas dos momentos lineares (os «movimentos») das partículas. E a segunda parte traduz-se formalmente por

$$m_1 \Delta v_1 = m_2 \Delta v_2$$

A nossa análise dos «*Principia*», no que se refere às leis de Newton, permite-nos estar de acordo com McClelland (1993, pp.100), quando afirma que Newton enunciou as suas leis de tal modo que “uma «acção» está *inextricavelmente associada com uma mudança de «movimento»*.” Os enunciados e exemplos que Newton apresenta mostram que ele pensava as leis em termos de impulsos e momentos lineares. A segunda lei, por exemplo, significa que o impulso aplicado num corpo é proporcional à taxa de variação do momento linear do corpo.

Quando a lei da acção-reacção é utilizada em situações de não-equilíbrio, como Newton fazia, aplicando-a partícula a partícula que interactivam directamente, constitui uma lei absolutamente independente das outras leis.

O problema levanta-se, e nem sempre esse problema aparece bem resolvido pelos autores de livros de Física, quando a lei é aplicada em situações de equilíbrio. É que, em tal caso, corre-se o risco de a aplicar indevidamente e de cair-se em tautologias ao usá-la em situações em que as forças são igualmente nulas como consequência da primeira lei, e não da terceira.

Se concordámos com McClelland no que respeita à interpretação que fez às ideias subjacentes às leis de Newton, já não podemos estar de acordo quando ele pretende limitar a terceira lei a impulsos e a forças resultantes.

Entendemos que o pretender aplicar-se directamente a terceira lei a forças resultantes é incorrecto. É fácil mostrar que é incorrecto o seguinte enunciado que esse investigador defende para a versão actual da terceira lei em termos newtonianos: *“Sempre que um corpo é actuado por uma força resultante, o outro corpo com o qual ele interage é actuado por uma força resultante igual e oposta”*.(Ibidem).

4.6.4 Concepções alternativas acerca da energia e da relação entre o trabalho das forças e a variação da energia dos corpos

Um dos conceitos mais importantes da Física é o conceito de energia. Este conceito é abordado nos programas de Física a vários níveis, a começar pelo ensino básico.

Os diversos manuais revelam diversas estratégias para o ensino do conceito. Assim distinguem-se claramente nos livros as seguintes abordagens: abordagem conceptual analítica; abordagem fenomenológica; abordagem utilitária; e abordagem baseada em problemas (Driver e Millar, 1985, pp. 16 a 21).

Ainda que existam estas diversas abordagens, há a possibilidade de distinguir duas correntes principais entre os professores no que respeita à natureza do conceito de energia (Driver e Warrington, 1985, p. 175):

- Há a corrente dos que fazem depender o conceito abstracto de energia do conceito mais concreto e formalmente bem definido de trabalho - que na sua forma geral é dado por $\int_{AB} \vec{F} \cdot d\vec{r}$, sendo AB o caminho ao longo do qual se calcula o trabalho.

Este conceito (e também o de calor, nos fenómenos termodinâmicos) é depois relacionado com as transferências de energia. Os professores que adoptam esta abordagem pertencem a um grupo que Warren, em 1982, rotulou como *conceptualistas*.

- E há a corrente dos que começam por lidar holisticamente com a energia, tiram todo o partido da experiência dos alunos acerca da energia, referem as várias transferências de energia, e só depois introduzem o conceito de trabalho como uma das possíveis medidas da energia transferida. Warren designa estes professores como *materialistas*.

Esta divisão deixa antever que os professores não estão de acordo acerca do esqueleto conceptual da energia, havendo concepções alternativas entre eles.

1. Concepções alternativas acerca da energia

A história do conceito de energia está recheada de dificuldades de ordem conceptual, conforme está patente num artigo que escrevemos sobre as concepções alternativas acerca desse conceito (Valadares, 1994, pp. 30 a 41), o qual está reproduzido em apêndice a este trabalho. Nesse artigo procurámos mostrar como algumas das concepções alternativas dos alunos acerca da energia foram também concepções que vigoraram em determinados períodos da história da Ciência e que actualmente são inaceitáveis.

Algumas dessas concepções alternativas dos alunos com profundas raízes históricas têm-se provado existirem igualmente entre os professores. Assim, por exemplo, em 1988 Kruger e seus colaboradores investigaram, por meio de entrevistas, as concepções científicas de vinte professores primários ingleses, e verificaram a existência de concepções alternativas anteriormente detectadas em alunos (Kruger, 1990, pp. 86 a 91), tais como:

- *A energia é algo que tem que ver com a vida.*
- *A energia tem necessariamente a ver com o movimento.*
- *A energia é uma grandeza que se identifica com a força.*
- *A energia é um tipo de força escondida.*
- *A energia é uma grandeza que não se conserva.*

Kirkwood, Carr e McChesney, na Nova Zelândia (1986) e Arzi, White e Fensham, na Austrália (1987), mostraram a existência de concepções alternativas sobre a energia idênticas em professores desses dois países. Por sua vez, Ogborn (1990, p. 81) verificou que os professores, tal como os alunos, têm a ideia de que a *energia é a causa das mudanças que ocorrem na Natureza*, ideia esta incompatível com os conhecimentos actuais de Termodinâmica.

Apesar dos inúmeros artigos acerca do conceito de energia, e de se terem realizado importantes conferências internacionais em que foi discutido o ensino dessa grandeza (referimos aqui, a título de exemplo, a *conferência realizada na Universidade de Leeds*, em 1985), subsistem nos manuais de Física portugueses e estrangeiros (para já não falar dos manuais de outras disciplinas, onde a situação é muito mais grave) diversas concepções alternativas envolvendo essa grandeza.

Para começar, há uma divergência quanto ao facto de a energia ser ou não definível. Há autores que não apresentam qualquer definição de energia, considerando-a mesmo indefinível. Há outros que apresentam de modo indiscutível uma definição, quase sempre a histórica e mecanicista definição de Rankine, sem sequer a porem em questão.

Pessoalmente, advogamos, tal como Feynman (1971, p. 4-2) e Zemansky (1970, p. 295) que *a energia é indefinível em toda a sua plenitude*, e que qualquer tentativa para a definir é redutora. Definições operacionais não existem. Das definições conceptuais, a melhor que conhecemos é esta, inspirada na definição histórica de Rankine (Dampier, 1986, p. 121):

Energia de um sistema é a capacidade do sistema para realizar trabalho e é medida pela quantidade de trabalho realizado.

Trata-se claramente de uma definição mecanicista que limita toda a polivalência do conceito, que se prestou a confusões históricas entre energia e energia mecânica (Valadares, 1994, p. 38) e ainda se presta a idênticas confusões nos nossos alunos.

Se, mesmo no domínio da Mecânica, a definição anterior não é isenta de crítica, fora desse domínio, particularmente quando entramos na Teoria da Relatividade Restrita, ela torna-se inaceitável. Sabemos que um corpo, pelo simples facto de existir com massa própria, tem energia, mas sabemos também como o princípio da conservação do número bariónico limita a possibilidade dessa energia de massa produzir trabalho.

Os autores que, fundamentando a definição de energia, vão procurar exemplificar a produção de trabalho, recorrem, por sistema, apenas á energia cinética. O exemplo que dão é o da partícula sobre a qual é realizado o trabalho W_1 e que, por esse facto, acumula a energia cinética $\frac{1}{2}mv^2$. Esquecem-se quase sempre de referir que a energia transferida para o corpo, medida pelo trabalho W_1 realizado sobre ele, só é igual ao trabalho que o corpo pode realizar se admitirmos que o trabalho realizado no agente que pára o corpo, W_2 , é igual a W_1 . Por trás desta definição está a lei da conservação da energia, sendo aqui que reside o fulcro do conceito de energia. A energia é uma grandeza, uma quantidade que “*não sabemos o que é*” (Feynman, 1971, p. 4-2), e que aprendemos a medir de modo que o seu valor se mantenha invariável no universo de um sistema (sistema mais ambiente) em evolução.

No que respeita à conservação da energia, há essencialmente duas abordagens, com variantes:

- Uns autores procuram associar conservação com invariabilidade, permanência de um valor constante. É o caso do seguinte enunciado:

“A energia não se cria nem se destrói mas transforma-se e transfere-se, sendo constante num sistema isolado” (Livro português VI, p. 24).

Ou esta outra variante:

“A energia conserva-se constante no Universo” (Livro português V, p. 24).

Como o Universo é, por definição, um sistema isolado, o segundo enunciado é um caso particular do primeiro.

- Outros autores associam preferencialmente conservação a uma variabilidade sem destruição nem criação. Optam, então, por enunciados semelhantes a este:

“A variação de energia de um sistema é simétrica da variação da energia do exterior com que interactua.”

Podemos argumentar que, considerando isolado o sistema formado pelo primitivo sistema mais o exterior, caímos no primeiro tipo de enunciados.

Isto é verdade, do ponto de vista formal, teórico, mas, do ponto de vista prático e didáctico, o segundo enunciado apresenta quanto a nós a grande vantagem de não exigir a existência de sistemas isolados (onde estão eles?). Esse enunciado «não marginaliza a termodinâmica prática» do automóvel, do foguetão, do ser humano, etc. Por outro lado, os autores que apresentam o primeiro tipo de enunciados caem frequentemente em situações pouco claras para os alunos.

Veja-se o exemplo de um dos autores anteriormente referidos, onde o sistema isolado é definido como *“aquele que não troca energia com o exterior”* (Livro português VI,

p. 11). Se o sistema não transfere energia para o exterior, os alunos não acharão absolutamente supérfluo dizer que a energia se conserva? Quando, depois, se lhe fala na degradação da energia, o que é supérfluo não redundará em confuso?

A linguagem física dos livros revela-se, muitas vezes, ambígua e, outras vezes, totalmente incorrecta. Vamos ver alguns exemplos:

Comecemos pela **energia térmica**.

No livro português VI está afirmado (p. 13) que “*a energia térmica é a energia libertada na combustão dos combustíveis*”. Todo o discurso dos autores aponta para a identidade conceptual:

$$\text{energia térmica} = \text{calor}$$

Os referidos autores identificam, por exemplo, *condução* com *transmissão de energia térmica* na página 33, e consideram-na um *processo de condução de calor*, na página seguinte.

Porém, na página 15, podemos ler no mesmo livro que “*a energia cinética interna ou energia térmica é a parcela da energia de um corpo devida à agitação das partículas que o constituem*.” Agora aqui verifica-se outra identidade conceptual:

$$\text{energia térmica} = \text{energia cinética interna}$$

Ora se a energia térmica é energia interna não é calor, se é calor não é energia interna.

O livro IV apresenta, por sua vez, na página 10, a seguinte definição também incorrecta de **energia térmica**: “*energia responsável pela modificação da temperatura*”.

Se tal definição fosse correcta, então também o trabalho ou a luz seriam considerados formas de energia térmica, pois também podem ocasionar modificações da temperatura.

Por estes simples exemplos, vemos como *a energia térmica é um termo ambíguo e que se deveria abolir do léxico da Física* (Caldeira e Martins, 1990, p. 93). A existência de nomes a mais para designar formas de energia é uma das causas das dificuldades conceptuais que os alunos têm no estudo da energia. Taber (1989, pp. 57 a 62) é bastante convincente ao criticar o uso de tantas expressões diferentes para a energia.

Uma outra concepção alternativa associada à energia que surge muitas vezes, principalmente em livros de Química e Biologia, mas também em livros de Física, é a de que *a energia que obtemos nas combustões e no organismo é a energia dos combustíveis e dos alimentos*.

Ross (1993, pp. 39 a 47) defende que “*não há energia nos alimentos e nos combustíveis, estes têm apenas um valor energético*”.

Não podemos perfiar uma tal ideia, pois todos os corpos têm energia interna. Os alimentos e os combustíveis que utilizamos, tal como os outros corpos, contêm, de facto, energia associada às ligações entre as partículas constituintes desses corpos, energia associada ao movimento dessas partículas e, ainda, energia equivalente à massa própria das partículas.

Aquilo em que estamos de acordo com Ross é que, quando utilizamos os combustíveis e os alimentos, a energia que obtemos não é a energia desses corpos, mas a energia dos sistemas constituídos por esses corpos e o oxigénio. A destruição das ligações das partículas dos alimentos e dos combustíveis não só não liberta energia como, pelo contrário, exige energia para ocorrer. A libertação de energia exige a substituição de ligações fracas por ligações fortes. Exige-se a presença de oxigénio com ligações

fracas entre os seus átomos e a formação de ligações fortes desses átomos de oxigénio com átomos de carbono e átomos de hidrogénio.

Portanto, *a energia não é libertada a partir dos alimentos ou dos combustíveis, mas a partir dos sistemas que eles formam com o oxigénio.*

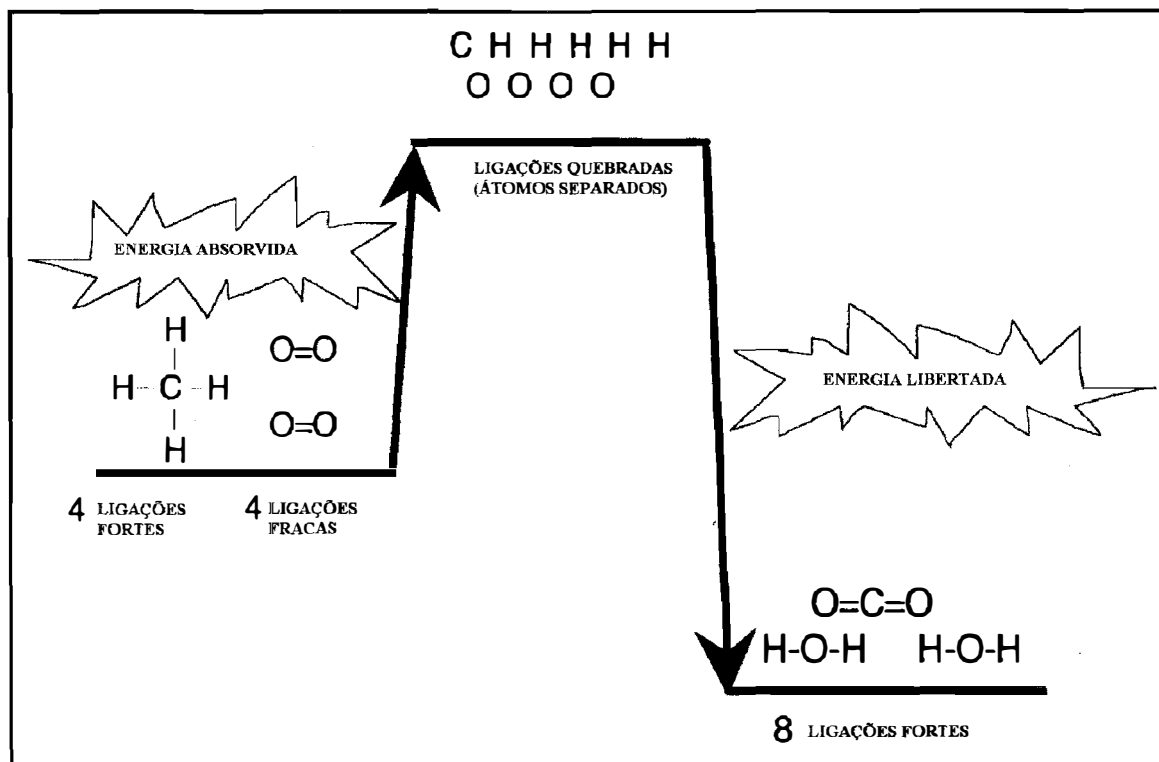


*Figura retirada do artigo «There is no energy in food and fuels
- but they do have fuel value» (Ross, 1993, p. 41)*

Tal como já afirmámos, a concepção alternativa, que os alunos possuem, de *que a energia é a causa dos acontecimentos* surge também amplamente disseminada nos manuais de Física e de outras disciplinas. É vulgar encontrarem-se nos manuais de ensino frases incorrectas que contêm esta ideia (Ogborn, 1986, p. 30), tais como as seguintes:

- *Um regato desce a montanha porque no cume desta a água possui energia potencial.*
- *Um automóvel move-se porque dispõe da energia da gasolina.*
- *Um balão sobe no ar porque possui energia cinética.*
- *Uma lâmpada ilumina uma sala porque o seu filamento tem energia.*
- *Um radiador eléctrico aquece um quarto porque o seu fio eléctrico tem energia eléctrica.*
- *Uma planta verde cresce em virtude da energia solar.*
- *etc.*

Sabemos que em todos os fenómenos intervém a energia, a qual condiciona o modo como os sistemas físicos poderão evoluir. Porém, em cada fenómeno mantém-se sempre em aberto mais do que uma possibilidade de evolução do sistema. Por exemplo, no caso da planta verde todo o processo poderia ocorrer ao contrário, ela definharia e enviar energia de volta para o Sol. Seguindo o sistema o caminho termodinâmico oposto, a energia conservar-se-ia do mesmo modo e a energia não impediria o processo de ocorrer. Ele não ocorre pelo simples facto de que o caminho termodinâmico oposto conduziria a uma diminuição da entropia do Universo, o que violaria a 2ª lei da Termodinâmica. É, pois, a entropia e não a energia que poderá justificar o facto de os fenómenos ocorrerem espontaneamente como ocorrem. O estado de um sistema evolui naturalmente sempre no sentido do aumento da entropia do Universo.

2. Concepções alternativas acerca da relação entre o trabalho e a energia

Na fase de desenvolvimento dos programas de Física em que a energia é relacionada com o trabalho, é costume dar-se enorme importância ao chamado «*teorema da energia cinética*». Começamos por rejeitar esta designação, por dois motivos:

- Primeiro, porque ela constitui uma reminescência da época em que se falava no «teorema das forças vivas», em que a «semi-força viva» é o que actualmente designamos por energia cinética. Nesse tempo e durante muitos anos a Mecânica foi tratada de um modo extremamente formal, como se fosse uma disciplina da área das Matemáticas. Ora, os pressupostos epistemológicos que estavam subjacentes a um tal tratamento da ciência física são hoje inaceitáveis.
- Em segundo lugar, porque tal designação transmite a ideia de que a afirmação a que se refere é independente da lei geral da conservação da energia, quando tal não é verdade.

Para além disso, são feitas muitas vezes afirmações que são incorrectas, a começar pelo próprio enunciado do «teorema». Em consonância com Bauman (1992, pp. 264-269), salientamos três dessas afirmações:

- *O trabalho realizado sobre um corpo é igual à variação da sua energia cinética.*
- *Se um corpo é actuado por uma força, há uma variação da sua energia cinética.*
- *Se um corpo não se move, não é realizado trabalho sobre o corpo.*

Estas afirmações ambíguas, pronunciadas vulgarmente de modo irreflectido, induzem a ideia incorrecta de que o teorema da energia cinética é uma lei geral da Física válida para qualquer corpo em quaisquer circunstâncias.

Comecemos pela primeira afirmação, que traduz um enunciado incorrecto da chamada lei da energia cinética ou lei do trabalho-energia. É uma afirmação incorrecta pois apenas é válida se o corpo puder ser considerado uma partícula sem estrutura, onde portanto não faz sentido analisar-se o seu comportamento termodinâmico. Um simples exemplo mostrará como aquela afirmação, quando aplicada a um corpo vulgar, é falsa.

Consideremos uma bola de goma que embate numa parede com a velocidade v_0 e fica colada à parede. No contacto com a parede, a velocidade da bola reduz-se a zero, isto é, há uma variação de energia cinética

$$\Delta E_c = 0 - \frac{1}{2} m v_0^2 < 0$$

No entanto, a força que a parede exerce na bola não realiza trabalho porque o ponto de aplicação dessa força não se desloca:

$$W = 0$$

O trabalho exercido na bola **não é igual** à variação da energia cinética da bola. Esta energia da bola é convertida em energia das partículas do corpo sem que haja qualquer trabalho exterior.

Passemos agora à segunda afirmação que diz respeito à actuação de um corpo por uma força. Torna-se fundamental conhecer não só o modo como essa força actua, mas também se actuam outras forças, o modo como actuam e qual é o comportamento termodinâmico do corpo.

Sendo o trabalho da força dado, em função do deslocamento, pela expressão

$$W = \int_{AB} \vec{F} \cdot d\vec{r} ,$$

onde AB é o caminho ao longo do qual se calcula o trabalho, torna-se evidente que o trabalho é nulo se a força actuar perpendicularmente à trajectória.

Mas pode uma força potente actuar num corpo (possuindo, então, uma componente que realiza trabalho positivo sobre o corpo) e não haver aumento da energia cinética do corpo. Basta que nesse corpo actue outra força resistente que realize um trabalho simétrico. O trabalho da primeira força mede a energia transferida do exterior para o corpo. O trabalho da segunda força mede a energia transferida do corpo para o exterior. Estas energias transferidas para dentro e para fora são iguais, pelo que a transferência global de energia para o corpo é nula.

Vejamos um *exemplo*:

Uma corda, puxada por uma mão, arrasta, por sua vez, um bloco de cimento, com velocidade constante.

Temos

$$W_{\text{mão na corda}} = \int_{AB} \vec{F}_{\text{mão na corda}} \cdot d\vec{r} > 0 ,$$

pelo que há uma energia (medida por este trabalho) transferida para a corda.

Porém a corda não armazena esta energia, porque, entretanto, a transfere para o bloco, ao realizar um trabalho sobre ele dado por

$$W_{\text{corda no bloco}} = \int_{AB} \vec{F}_{\text{corda no bloco}} \cdot d\vec{r} > 0 ,$$

O bloco também exerce, por sua vez, um trabalho na corda simétrico do anterior:

$$W_{\text{bloco na corda}} = \int_{AB} \vec{F}_{\text{bloco na corda}} \cdot d\vec{r} = - W_{\text{corda no bloco}}$$

O trabalho total na corda é nulo e, como tal, não há transferência global de energia para a corda.

Passemos finalmente à terceira afirmação. Ela também pode ser falsa, conforme se mostra facilmente continuando a explorar o exemplo anterior.

Com efeito, um bloco arrastado no chão também nunca armazena toda a energia que para ele foi transferida, pois transfere energia para o chão. Há uma força de atrito que actua no bloco que realiza um trabalho negativo

$$W_{\text{chão no bloco}} = \int_{AB} \vec{F}_{\text{atrito}} \cdot d\vec{r} < 0 ,$$

porque a força de atrito se opõe ao movimento.

Porém, se há um trabalho negativo do chão no bloco, haverá também um trabalho do bloco no chão positivo e simétrico daquele:

$$W_{\text{bloco no chão}} = - \int_{AB} \vec{F}_{\text{atrito}} \cdot d\vec{r} > 0 .$$

Concluimos, assim, que *é exercido um trabalho positivo no chão sem que o chão se mova!*

Estes e outros exemplos sustentam a tese de que, ao definir-se o trabalho de uma força, há toda a vantagem em o definir não só em termos dinâmicos,

$$W = \int_{AB} \vec{F} \cdot d\vec{r} ,$$

como, também, em termos termodinâmicos,

$$W = \Delta E$$

considerando o trabalho de uma força como uma medida de energia transferida entre um sistema e o ambiente (Bauman, 1992, p. 264).

As duas definições completam-se de modo a tornar mais simples a análise dos problemas envolvendo transferências de energia.

Os exemplos apresentados apontam também para a conclusão de que a lei do trabalho--energia é válida, sem reservas, para partículas e sistemas de partículas que se comportam como partículas, como é o caso dos sistemas em translação pura. Neste caso todas as partículas sofrem deslocamentos iguais ao seu centro de massa e podemos escrever

$$W_{\text{resultante}} = \int_{AB} \vec{F}_{\text{resultante}} \cdot d\vec{r}_{CM} = \Delta E_C$$

No caso geral há variação da energia interna, já que as posições relativas das partículas do sistema mudam e, conseqüentemente, muda a energia potencial do sistema. Já não podemos afirmar que o trabalho realizado sobre o sistema é igual à variação da energia cinética.

A lei do trabalho-energia tem, quanto a nós, um carácter tautológico e supérfluo. No fundo é um caso particular da primeira lei geral da Termodinâmica: a lei geral da conservação da energia. A essência dessa lei, também conhecida por lei da energia cinética (antigo «teorema das forças vivas») poderá traduzir-se do seguinte modo:

A energia fornecida a um sistema por meio da realização de trabalho exterior (mede-se através do trabalho realizado) é igual à variação da energia cinética do sistema sempre que o sistema só sofre variações da energia cinética.

4.6.5 Concepções alternativas acerca do calor e da temperatura

A evolução histórica das ideias acerca do calor fez-se com enormes dificuldades conceptuais (Valadares, 1994, pp. 35 e 36). Durante muitos anos defrontaram-se duas concepções:

- uma concepção corpuscular, segundo a qual o calor existe nos corpos e é o resultado do movimento dos corpúsculos de matéria;
- e uma concepção etérea, de acordo com a qual o calor é um fluido - o *calórico* - que existe em quantidades diferentes nos corpos, porque têm capacidades diferentes para o armazenar, e que transita dos corpos quentes para os frios quando são postos em contacto térmico (designações como a de calor latente e capacidade calorífica remontam à época do calórico).

Hoje, qualquer das concepções históricas que associam o calor a um conteúdo dos corpos, seja ele qual for, é cientificamente inaceitável. O calor não é uma função termodinâmica de estado de um sistema e não pode ser atribuído ao sistema, qualquer que seja o estado deste. Nessa ordem de ideias a afirmação, que aparece ainda em alguns livros, de que “*o calor de um sistema é a energia cinética do movimento caótico das suas moléculas*” é uma concepção alternativa profundamente arraigada na história. Ogborn chama-lhe uma “*heresia abominável*” (Ogborn, 1976, p. 275).

Para além destas há outras afirmações que traduzem e/ou induzem nos estudantes a concepção alternativa de que o calor é algo que está contido nos corpos. Seguem-se algumas dessas frases retiradas de livros para o ensino (Summers, 1983, p. 670, Mak e Young, 1987, p. 464):

- *O calor é uma forma de energia cinética.*

- *O calor é energia. É a energia total das moléculas em movimento nos corpos.*
- *A energia calorífica converte-se em energia do movimento.*
- *É produzido calor como um subproduto do metabolismo.*
- *A energia provém do calor da chama.*
- *As gorduras contêm maior conteúdo calorífico.*
- *Todo o trabalho realizado sobre o corpo pode ser convertido em movimento caótico das moléculas do corpo, surgindo na forma de calor.*
- *Todo o calor vem até nós, directa ou indirectamente, do Sol.*
- *etc.*

A palavra *aquecimento* aparece nos livros com diversos significados, alguns deles traduzindo claramente concepções alternativas. Assim, por exemplo:

- Para uns autores, *aquecimento* significa *aumento de temperatura*.

De acordo com esta noção, quando pomos umas pás a rodar dentro de água e aumentamos a temperatura desta, estamos a aquecer a água.

E, pelo contrário, ao colocarmos um bloco de gelo em fusão junto a uma chama já não estamos a aquecer o bloco, pois a sua temperatura não está a aumentar.

Muitas vezes os autores que possuem esta noção de aquecimento contradizem-se, ao considerarem o exemplo do bloco de gelo como aquecimento.

- Para outros autores, *aquecimento* de um corpo significa *transferência de calor* para ele como resultado de uma diferença de temperatura entre esse corpo e outro que lhe fornece o calor. Só que a ideia que está subjacente a esta definição é igualmente inaceitável, pois consideram essa cedência de calor uma cedência de energia interna, havendo autores que o afirmam explicitamente. Ora esta ideia de considerar o calor como uma transferência de energia interna resultante de uma diferença de temperatura é uma das concepções alternativas do ensino do calor (Mak e Young, 1987, p. 467). Quando a energia potencial de um sistema, por exemplo, um sistema sonda espacial -Terra diminui, é legítimo afirmar que a energia potencial se transferiu? A energia potencial diminuiu porque aumentou outra forma de energia do sistema, a sua energia cinética. Ela não se transferiu, uma propriedade de um sistema não se transfere, a densidade de uma solução aquosa varia mas não se transfere.

Consultámos alguns manuais de ensino portugueses. Neles verificámos que a palavra *calor* aparece, várias vezes, com o seguinte significado incorrecto: “*energia transferida quando há variações de temperatura*” (por exemplo, livro V, p. 14). Pode haver trocas de calor, sem variações de temperatura, como sucede nas mudanças de fase de agregação ou desde que se trate de fontes e receptores de calor em que a energia recebida e cedida por processo calorífico é contrabalançada por outras trocas de energia, por exemplo por realização de trabalho ou por radiação.

Registámos que há total divergência quanto ao facto de a *radiação* ser ou não ser um processo de propagação de calor. Enquanto que há autores que consideram a radiação apenas como um mecanismo electromagnético e evitam totalmente falar em calor a propósito de um tal mecanismo (por exemplo, o livro português VII, p. 38), outros mantêm explicitamente a concepção histórica da radiação como processo de transmissão de calor (por exemplo, o livro VI, p. 33).

No primeiro dos nossos dois artigos sobre energia (anexo no Apêndice 5 a este trabalho), tivemos oportunidade de mostrar que a ideia de que a radiação é um processo de transmissão de calor é uma concepção alternativa alicerçada na história (Valadares, 1994, p. 36).

Quanto à temperatura, existe também uma concepção alternativa que está patente em muitos livros de ensino: a de que *a temperatura de um corpo é uma medida da energia cinética média das partículas do corpo*. Trata-se de uma extrapolação abusiva do modelo cinético-molecular do gás ideal a toda a restante matéria. É correcto, por exemplo, afirmar-se que quanto maior é a temperatura de um corpo molecular (por exemplo, o gelo), mais energia possuem as suas moléculas. Mas, se tivermos dois corpos moleculares diferentes (por exemplo, o gelo e o gelo seco) com a mesma energia cinética média por molécula, nada justifica afirmar-se que eles estão à mesma temperatura.

4.6.6 Concepções alternativas acerca da massa

Vimos em 4.2.3.2 que é possível distinguirem-se diversas representações acerca da grandeza massa: ontológicas, funcionais, translacionais, relacionais e operacionais. Analisámos diversos manuais muito utilizados por professores portugueses nestes últimos anos, e verificámos a existência de algumas destas representações alternativas. Vamos ver alguns exemplos.

O manual português IX, por exemplo, introduz a *massa* a propósito do “2º princípio da Dinâmica ou princípio fundamental da Dinâmica ou 2ª lei de Newton” (perguntamos, é lei ou princípio?) traduzido na forma

$$\vec{F} = k\vec{a}$$

Fá-lo do seguinte modo: “*Num sistema coerente de unidades o número k mede uma grandeza característica do móvel - a sua massa (m). Assim, o princípio fundamental da Dinâmica traduz-se por:*

$$\vec{F} = m\vec{a} \text{ “ (pp. 100 e 101)}$$

Críticas:

- k não é um número (como se afirma); se k fosse um número não podia medir a massa.
- não tem razão de ser a exigência de se tratar de um sistema coerente de unidades.

Na continuação do referido 2º princípio, introduz-se em separado um terceiro - o *princípio da independência das forças simultâneas*, seguido de um quarto - o *princípio da acção-reacção*:

Crítica:

Tal como mostrámos a propósito da concepção alternativa de que «*a segunda lei de Newton é uma definição*», o princípio da independência das forças simultâneas está subjacente à 2ª lei de Newton e *é epistemologicamente incorrecto separá-lo dela*.

Esta abordagem do conceito de massa traduz uma noção que Doménech et al. (1993) designaram por “*noção OP*”, por ser operacional e inercial, quer dizer: a massa aparece como uma grandeza definida com base numa operação de medida e trata-se de uma massa inercial.

Porém, logo a seguir, no mesmo livro (p. 108) refere-se que “*uma massa, m , isolada, colocada num ponto do campo gravítico da Terra dá lugar ao aparecimento das forças atractivas entre a Terra e o corpo de massa m .*”

Aqui já estamos perante uma “*noção FG*”, por se tratar de uma representação em que a massa agora é gravitacional e aparece como algo que um corpo possui graças ao qual o corpo é atraído para a Terra, mas onde a relação entre a força e o campo gravítico não é explicitada.

Os autores do manual XI baseiam-se na acção da mesma força em dois corpos diferentes, um grande e um pequeno (sem qualquer preocupação quanto à natureza dos corpos) para introduzir o conceito de massa (pp. 114 e 115). Depois de mostrarem que os dois corpos adquirem acelerações diferentes, escrevem o seguinte:

“A massa de um corpo está relacionada com a resistência que esse corpo oferece ao movimento e esta «resistência ao movimento» é tanto maior quanto maior for a quantidade de matéria do corpo.

Na prática, a medida da massa de um corpo é dada pelo valor das «massas marcadas» colocadas no prato direito de uma balança para equilibrar a massa do corpo no outro prato”.

Críticas:

- Tal como já mostrámos noutro local, esta «resistência ao movimento» pode fortalecer nos alunos representações alternativas baseadas numa teoria pessoal do ímpeto.
- Como se comparam as quantidades de matéria de dois carros diferentes (um dos exemplos apresentados)?
- Porquê o preciosismo da colocação das massas marcadas no prato direito da balança? Há algum código definido, tipo código de estrada?!

Em termos de noções alternativas, estamos perante três noções de massa em meia dúzia de linhas:

- uma “*noção OM*”, já que a massa aparece como uma grandeza identificada com a quantidade de matéria;
- uma “*noção FP*”, porque a massa surge como uma propriedade que se identifica com a inércia;
- uma “*noção OG*”, porque a massa também surge como uma grandeza medida com a balança de pratos.

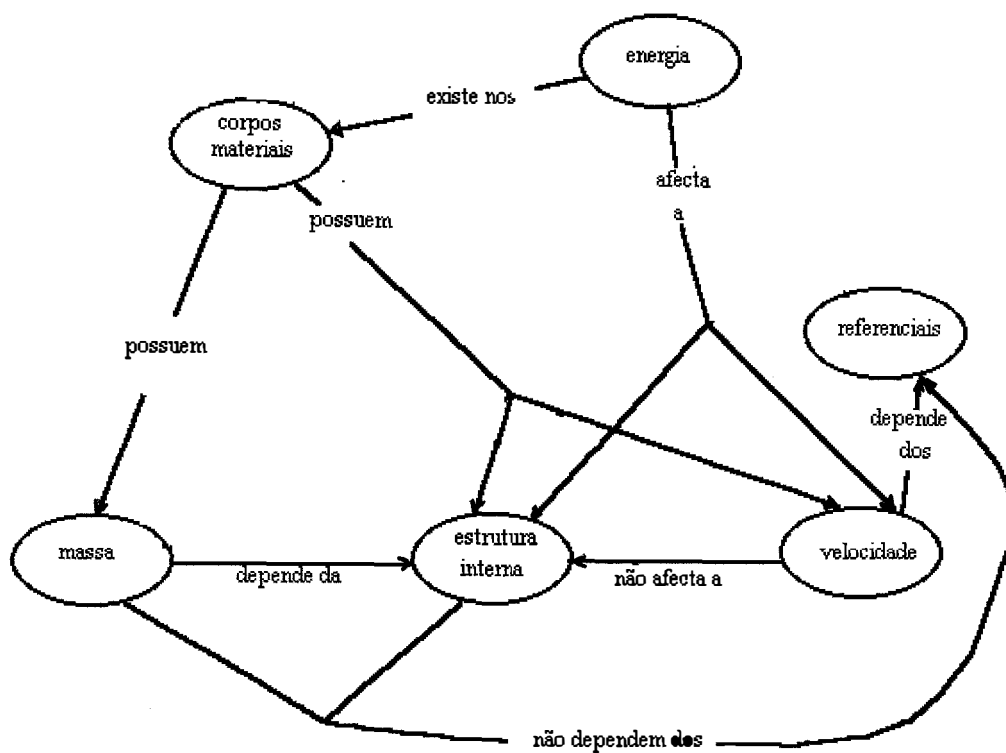
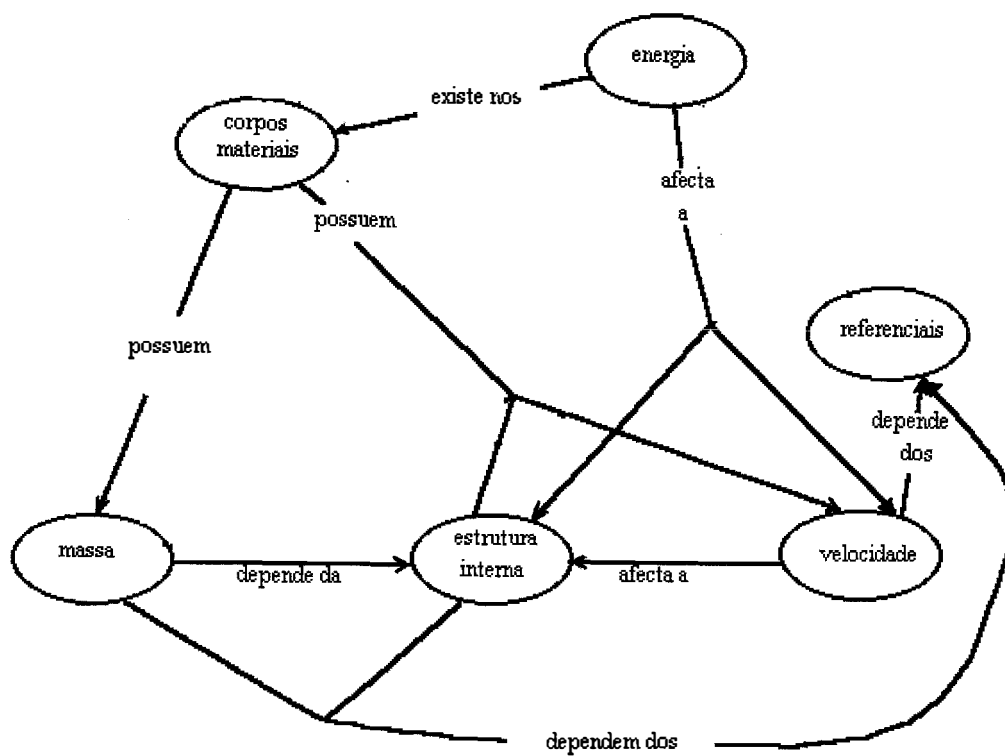
Historicamente surgiram diversas concepções de massa, e essas concepções diversas continuam a subsistir no ensino da Física.

As concepções históricas que a ciência física nos proporcionou serão discutidas noutra local. Aqui limitar-nos-emos a dizer que ainda subsiste, em muitos professores, a concepção newtoniana de que *a massa* de um corpo é *a quantidade de matéria que possui*.

Esta concepção assenta numa visão absolutista do espaço e do tempo e é claramente alternativa à concepção relativista de *massa* como *medida do conteúdo de energia de um corpo* ou *energia do corpo no referencial próprio*.

Mas, mesmo já no domínio relativista, há duas concepções alternativas acerca da massa. Para facilmente e rapidamente transparecer o facto de se tratar de duas concepções estruturalmente distintas, vamos recorrer a uma comparação entre dois mapas conceptuais, que figuram na próxima página:

- o primeiro mapa pretende visualizar uma estrutura cognitiva de um professor que possui a concepção de massa relativista;
- o segundo mapa pretende «externalizar» a estrutura cognitiva de um professor que já **não adere** ao conceito de massa relativista



Tal como procuramos fundamentar nos artigos que anexamos nos Apêndices 3 e 4, a ideia de massa relativista é uma concepção alternativa. Desde há alguns anos que alguns físicos têm vindo a alertar a comunidade educativa para esse facto (Adler, 1987, Alcaine, 1989, Okun, 1989, Baierlein, 1991, Taylor e Wheeler, 1992, Valadares, 1993). No entanto, essa concepção ainda se vê muito espalhada no nosso ensino.

Os mapas conceptuais anteriores procuram mostrar facilmente que a diferença essencial nas duas estruturas cognitivas está no modo como estão ligados os conceitos de velocidade e estrutura interna. A diferença nesta ligação conceptual repercute-se depois.

Uma outra concepção alternativa (quanto a nós!) é a que refere a conversão da matéria em energia. Se a matéria é tangível, é algo que nós vemos e apalpamos, é formada de «coisas» materiais a que chamamos átomos e moléculas, como entender que ela se converta numa «coisa» intangível, num conceito abstracto, num «constructo»?

Se tal sucedesse estaríamos perante uma conversão análoga à de água (matéria) em densidade (outro conceito).

Também é uma concepção alternativa a ideia de que a massa se transforma em energia. A ideia que Einstein possuía é a de que o princípio da conservação da massa se identifica com o da conservação da energia. Se eles se identificam, isso significa que, ao variar a massa de um sistema, varia concomitantemente a sua energia e, ao conservar-se a massa de um sistema, conserva-se ao mesmo tempo a sua energia. Esta representação está completamente de acordo com a visão espaço-temporal da relatividade do movimento (Valadares, 1993).

Terminamos esta secção com um quadro onde reproduzimos algumas afirmações incorrectas (quanto a nós!) que continuam a aparecer em manuais de Física portugueses e estrangeiros com um pequeno comentário a cada uma:

AFIRMAÇÃO INCORRECTA	COMENTÁRIO
A massa e a energia de uma partícula são grandezas equivalentes.	Não são, já que a massa é a grandeza do quadri-vector momento-energia e a energia é apenas uma componente do mesmo.
Houve uma conversão de matéria em energia.	Não é possível os corpos, entidades tangíveis, converterem-se numa propriedade, uma entidade abstracta.
No interior de um sistema isolado houve uma conversão de massa em energia.	Não é possível, pois o conteúdo de energia do sistema não variou, logo a massa, que equivale a esse conteúdo, também não mudou.
A massa total de um sistema de partículas é igual à soma das massas das partículas.	Não é, pois para a massa do sistema também contribui todo o conteúdo de energia do sistema que não é energia de massa.
Quando a massa da partícula é nula, a energia também é nula.	Não é. O fóton, por exemplo, tem massa nula e tem energia não nula.
A massa de um corpo é uma medida da quantidade de matéria do corpo.	A quantidade de matéria de um corpo é traduzida pelo número de partículas do corpo e nunca varia para o mesmo corpo. Mas a sua massa varia, desde que o conteúdo de energia do corpo varie.
Se um objecto a alta velocidade acelera, a sua massa aumenta.	Não. O que acontece é uma dilatação relativista do tempo necessário para a velocidade sofrer um mesmo aumento de velocidade. O que aumenta é o tempo e não a massa.

4.6.7 Concepções alternativas reveladas por professores de níveis elementares de ensino

Quando foram lançados os novos programas, tivemos a oportunidade de abordar o tema energia com professores da área de Educação Visual e Tecnológica em duas sessões, uma no Porto e outra em Lisboa. Registámos por meio do diálogo mantido com esses professores, que grande parte deles possuía concepções alternativas idênticas às que se têm descoberto nos alunos e que Kruger também detectou em professores ingleses (4.6.4.1).

Têm sido pesquisadas as representações que professores que ensinam Ciência em níveis elementares possuem acerca de diversas grandezas e fenómenos físicos. Vamos apresentar alguns resultados retirados dos trabalhos que conhecemos.

- Rollnick e Rutherford (1990) verificaram que professores primários africanos tinham representações aristotélicas acerca da atmosfera e da pressão do ar. Para eles o facto de o ar ocupar espaço explica a pressão.

Era com base numa concepção semelhante à desses professores que Aristóteles explicava o movimento dos projecteis no ar.

- Kruger e Summers (1989), num estudo também efectuado com professores primários, acerca das representações sobre as mudanças de fase de agregação, registaram que alguns deles falavam da ebulição e da condensação como exemplos de transformações químicas e muitos deles apresentaram interpretações inaceitáveis para a formação das bolhas na água em ebulição e outros nem arriscaram qualquer interpretação.

Dos 19 professores, apenas 3 utilizaram correctamente o modelo molecular e apenas para a ebulição (1989, p. 25). A grande maioria dos professores misturaram nas suas interpretações crenças intuitivas com noções científicas mal recordadas.

- H. Reynoso, H. Fierro, G. Torres, M. Vicentini-Missoni e J. Celis (1993, pp. 127 a 138) pesquisaram as representações de 19 professores primários mexicanos acerca da queda livre dos corpos e encontraram que muitos deles tinham essencialmente as mesmas concepções alternativas que possuem os estudantes do ensino secundário e pré-universitário, em particular a ideia de que *os corpos caem na Terra mas flutuam na Lua*. E também notaram a existência de concepções alternativas em 2 professores do ensino pré-universitário, numa amostra de 20 (Ibidem, p. 135).
- Summers (1992, pp. 25 a 40), trabalhando no projecto PSTS (Primary School Teachers and Science), que investigou as dificuldades dos professores primários ingleses acerca dos conceitos físicos, concluiu que há um desfasamento entre o que os programas do *curriculum* inglês e galês exigem dos professores primários e a sua compreensão dos conceitos físicos. Eis algumas das dificuldades detectadas:
 - *o não reconhecimento das forças passivas, tal como a reacção do chão sobre um corpo nele apoiado;*
 - *o não reconhecimento do atrito como uma força;*
 - *o não reconhecimento do peso como uma força;*
 - *a existência de crenças numa teoria do ímpeto como explicação para os movimentos;*
 - *dificuldade em distinguir conceitos semelhantes, como força e momento.*
- Galili (1993, pp. 149 a 162) pesquisou as ideias de professores em pré-serviço acerca dos graves. Encontrou, entre outras, as seguintes deficiências:

- *não consideração de forças passivas tal como a força de reacção nos corpos apoiados e da força de tensão nos corpos suspensos;*
- *uma compreensão incorrecta da imponderabilidade;*
- *interpretações incorrectas da perda de peso nos corpos mergulhados nos líquidos;*
- *a impossibilidade de proporcionar peso aos astronautas por meio da chamada «gravidade artificial».*

A respeito destas últimas dificuldades, que dizem respeito à imponderabilidade, à gravidade artificial e a todos os fenómenos que ocorrem em veículos acelerados, cabe aqui referir a concepção alternativa existente em muitos professores de que *as forças de inércia são forças fictícias*. Numa das próximas secções referir-nos-emos a esta concepção alternativa em particular.

4.6.8 Mais algumas ideias confusas e/ou incorrectas detectadas no ensino da Física em Portugal

1. Acerca da velocidade...

A velocidade em Física tem um significado rigoroso que transcende o significado vulgar dessa grandeza.

No dia a dia usamos a palavra velocidade para significar se um dado corpo em movimento vai depressa ou devagar. Como conhecemos em geral a estrada por onde um carro segue, ou seja a sua trajectória, preocupamo-nos, essencialmente, em saber se a distância que o carro vai percorrendo sobre a trajectória está a variar depressa ou devagar. Um carro a alta velocidade «está a palmilhar metros muito rapidamente».

As organizações internacionais encarregues das convenções, terminologia e símbolos, particularmente a «*União Internacional de Física Pura e Aplicada*» (IUPAP) e a «*Organização Internacional de Normalização*» (ISO) recomendam o uso da letra s para indicar uma distância percorrida ao longo da trajectória, conforme se pode verificar na Norma Internacional ISO 31/1 - 1978, p. 4, no documento IUPAP - 25 (SUNAMCO87-1, 1987, p.27) ou num livro (amplamente divulgado entre nós) sobre o Sistema Internacional, aprovado pela Sociedade Portuguesa de Física (Almeida, 1988, p. 84).

Assim sendo, podemos afirmar que o significado vulgar de velocidade pode ser traduzido pela expressão matemática

$$v = \frac{ds}{dt}$$

Em Ciência, o significado da palavra velocidade é outro, mais abrangente. É sabido que a grandeza fulcral em cinemática, dada a relatividade do movimento, não é a distância percorrida por uma partícula sobre a trajectória, com um significado absoluto que não pode ter, mas a posição da partícula, definida por um vector posição $\vec{r}$, relativamente a cada referencial.

Por exemplo, nenhum astrónomo, ao estudar o movimento de um cometa, vai poder incluir nas condições iniciais a distância que o cometa já andou sobre a trajectória até ao instante zero. Quem a conhece? O astrónomo vai, sim, definir a posição inicial, a partir de um vector $\vec{r}_0$ num referencial e descrever o movimento do cometa. Para isso, estuda o modo como a posição vai variando no decurso do tempo. No fundo, trata-se de conhecer a equação do movimento do cometa, isto é, a função matemática que relaciona a sua posição com o tempo.

O cometa não percorre a sua trajectória sempre com a mesma velocidade. Quando vai mais depressa, a sua posição (definida pelo vector posição, $\vec{r}$) está a variar mais depressa. Quando vai mais devagar, o vector $\vec{r}$ está a variar mais devagar. A velocidade é, pois, a taxa de variação instantânea da posição, pelo que é formalmente dada por

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

Trata-se, portanto, de uma grandeza vectorial e a sua definição física é a seguinte:

Velocidade é a grandeza que indica se um corpo está a mudar de posição depressa ou devagar e em que direcção e sentido está a mudar de posição.

Facilmente se mostra que o módulo ou medida da velocidade é $v = \frac{ds}{dt}$, pelo que coincide com o significado vulgar de velocidade.

A língua inglesa tem designações distintas para as grandezas $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$ e $v = \frac{ds}{dt}$. A primeira é designada por «*velocity*» e a segunda por «*speed*» (Ohanian, 1994, p. 41, Gettys, Keller e Skove, 1993, p. 33, Halliday, Resnick e Walker, 1993, p. 21, Tipler, 1978, vol 1, p. 56).

Tipler, por exemplo, escreve textualmente que “*the magnitude of the instantaneous velocity is called the speed ds/dt* ” (1978, vol 1, p. 56). Esta grandeza acaba por ser o módulo da velocidade, ou seja a raiz quadrada da soma dos quadrados das componentes:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

A velocidade $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$, num dado instante t_n , é o limite da velocidade média, $\vec{v}_m = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$, quando o intervalo de tempo Δt (que engloba o instante t_n) tende para zero.

A velocidade média («*average velocity*») é, pois, o deslocamento efectuado por unidade de tempo, e **não a distância percorrida pelo corpo móvel por unidade de tempo** («*average speed*»). Difere, pois, da grandeza que em linguagem vulgar nós chamamos velocidade média: $\frac{\Delta s}{\Delta t}$.

Os diversos livros brasileiros de Física usam a designação «*velocidade escalar média*» para traduzir uma distância percorrida por unidade de tempo, atribuindo-lhe um significado algébrico para indicar o sentido. Alguns autores portugueses fazem exactamente o mesmo. E, em vez de utilizarem a medida da velocidade ou módulo da velocidade ou rapidez («*speed*»), dada por $v = \frac{ds}{dt}$, usam uma «*velocidade escalar*» também com significado algébrico.

Os inconvenientes que vemos nestas opções são três:

- em primeiro lugar, sendo a velocidade, em Física, uma grandeza eminentemente vectorial, é potencialmente confuso estar-lhe a acrescentar um adjectivo que tem que ver com a antítese desse tipo de grandezas;
- em segundo lugar, essas designações fortalecem a concepção alternativa dos alunos de que a velocidade é uma grandeza escalar (importada da linguagem vulgar), pelo que se dificulta ainda mais a sua libertação dessa ideia (basta propormos aos alunos um problema de colisão perpendicular de uma bola com uma parede, para vermos quão arraigada está essa concepção);

- por último, não se justifica recorrer a três palavras quando bastam duas, *rapidez média* (ou *celeridade média*) para traduzir a designação «*average speed*», e também não se justifica usar duas palavras em vez de uma, *rapidez*, para traduzir a designação «*speed*».

A nossa experiência de ensino leva-nos a afirmar que é muito mais rigoroso e claro para os alunos o uso de duas designações totalmente distintas:

- rapidez, para tudo o que tem que ver com a distância percorrida sobre a trajectória:

$$\text{rapidez média} = \frac{\Delta s}{\Delta t} ; \text{rapidez instantânea} = \frac{ds}{dt}$$

- e velocidade para tudo o que tem que ver com mudança de posição (ou deslocamento) do móvel:

$$\text{velocidade média} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} ; \text{velocidade instantânea} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

O desrespeito pelas recomendações internacionais conduz à existência de diferentes notações em livros diferentes do nosso país.

Há autores, por exemplo, que, respeitando as normas internacionais, utilizam a letra *s* para designar a distância (nunca negativa e nunca decrescente) que uma partícula percorre ao longo da sua trajectória (manual X, p. 25, por exemplo).

Outros autores utilizam a letra *s* para designar uma coordenada (positiva, negativa ou nula) sobre a trajectória a partir de um ponto desta: é a medida algébrica do arco compreendido entre a origem e o ponto considerado (manual VIII, p. 99, por exemplo).

Este facto contribui para a confusão dos alunos, principalmente para aqueles que mudam de manual de ano para ano, e dificulta a tarefa nos exames (quando a notação usada nas provas difere da usada nas aulas). Mas a confusão transforma-se em incoerência e imprecisão quando depois os professores começam por usar a notação, mas não a respeitam à frente.

Um *exemplo*:

Há livros que utilizam a letra s com o significado de coordenada (algébrica) sobre uma trajectória e depois, mais à frente, definem matematicamente a medida ou módulo da velocidade por $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}$. É que, sendo s uma coordenada algébrica que ora cresce ora decresce no tempo (a função $s = f(t)$ ora é crescente ora é decrescente), então tem-se que o $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}$ é ora positivo ora negativo. Mas esta taxa de variação é o módulo de uma grandeza vectorial, a velocidade, e não pode ser negativo. Grandezas vectoriais com módulos ou medidas negativas não existem!

Resumindo e concluindo:

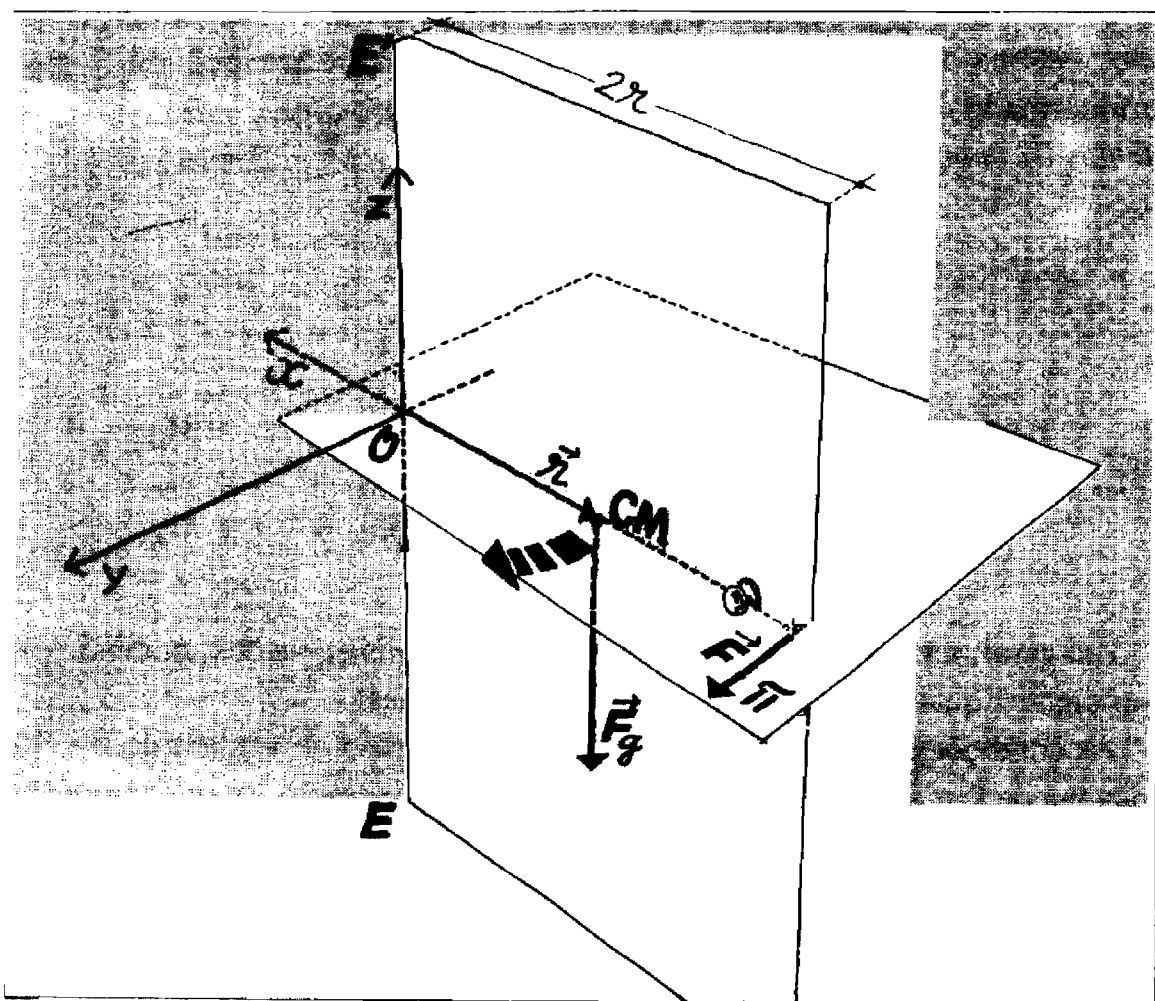
Em Física, só existe uma velocidade que é uma grandeza vectorial, a que portanto está associada uma direcção, um sentido e um módulo. A velocidade de que falamos na linguagem vulgar não é uma nova grandeza física. É tão só o módulo da velocidade. Não se justifica, então, uma designação diferente para o módulo da velocidade. Não compreendemos pois o fundamento da designação «*velocidade escalar*». Quando vulgarmente afirmamos que exercemos uma força de 200 N também dizemos que exercemos uma «força escalar» de 200 N?

A concepção alternativa de que a *velocidade é uma grandeza numérica* sai bastante reforçada com o uso de linguagem potencialmente confusa como esta, em claro desrespeito pelas recomendações internacionais de normalização.

2. Acerca do equilíbrio do sólido indeformável

Alguns professores, ao ensinarem a estática do corpo rígido, consideram como exemplo do equilíbrio de rotação uma porta normal em rotação uniforme. Ora, uma tal porta não está em equilíbrio, ao contrário da porta de eixo ao meio (tipo porta de banco).

Com efeito, uma vez que o centro de massa da porta tem movimento circular uniforme, há uma força resultante não nula a actuar na porta, de acordo com a lei do centro de massa (Bessa, 1985, pp. 54 a 56). Assim sendo, não se cumpre uma das condições para o equilíbrio dinâmico de rotação que é a soma das forças exteriores ser igual a zero.



4.7. Características das concepções alternativas dos professores

Na secção 4.3 analisámos as concepções alternativas dos alunos tornando-se possível sintetizar algumas características reveladas por essas concepções. Vamos agora também analisar as concepções alternativas dos professores, de modo a fundamentar as suas mais importantes características.

4.7.1 *A analogia entre as concepções alternativas dos professores e as concepções históricas*

No tratado de «*Physica Elementar*» de Francisco Nobre (1895), que marcou o ensino da Física no nosso país nos finais do século passado e princípios do nosso século, pode ler-se o seguinte:

“O calor é o resultado d’um movimento vibratório particular das moléculas dos corpos quando apreciadas directamente pelos órgãos da sensibilidade geral. As sensações que se experimentam quando se tocam os corpos que se diz que estão quentes, frescos ou frios são devidas a esta forma de movimento vibratório mais ou menos rápido” (Nobre, 1895, p. 215).

Por sua vez, na 51ª edição de um manual de grande divulgação no século passado, o «*Physique*», de Langlebert, podemos ler o seguinte:

“Admite-se hoje que o calor é o resultado de um movimento vibratório, muito rápido e muito pequeno, das moléculas da matéria ponderável, transmitida de um corpo a outro por intermédio de um fluido espalhado por todo o Universo, a que se chama éter” (Langlebert, 1896, p. 145).

Num outro manual português, já mais recente do que os dois manuais acabados de referir, embora ainda da primeira metade do nosso século, podemos ler o seguinte:

“Um corpo quente tem as suas partículas vibrando com mais rapidez do que um corpo frio; de modo que, friccionando os corpos, percutindo-os, comprimindo-os, etc., a energia mecânica dispendida vai activar as vibrações das moléculas, isto é, vai aparecer sob a forma de calor, que é a energia molecular. A elevação de temperatura dum corpo corresponde ao acréscimo desta energia, o abaixamento de temperatura à sua diminuição» (Silva e Machado, s/d, p. 377).

Referindo-se ao aquecimento de água fria pelo acrescento de água quente, os autores de um manual português ainda mais recente, por onde alguns dos actuais professores portugueses estudaram, escrevem o seguinte:

“Explicando o fenómeno desta maneira, consideramos o calor como alguma coisa que pode passar de um corpo quente para outro; sempre, é claro, do que estiver mais quente para o que estiver mais frio (...)

Quer dizer, a elevação de temperatura da água foi aqui produzida pela mesma causa que aquece um corpo quando o expomos ao Sol, ou o aproximamos da chama de de um fogareiro, duma lâmpada, etc., causa à qual já anteriormente tínhamos dado o nome de calor.

(...)

Concluimos, pois, que nela se encontra adicionada uma quantidade de calor 2, 3, 4 vezes maior do que aquela que se encontra adicionada num só quilograma” (Manual XIV, p. 269).

Esta ideia de calor que, como vemos através destas citações, se propagou no tempo, a representação do calor como algo associado às partículas de um corpo, que se propaga sempre dos corpos quentes para os mais frios, e que é a causa incondicional do aquecimento dos corpos, é muito antiga.

Assim, já no século XVI Francis Bacon (1561-1626) afirmava que o calor é “*um movimento de expansão e ondulação das partículas dos corpos*” (Schurmann, 1946, p.131).

Embora grandes cientistas tais como Descartes, Leibniz, e Daniel Bernouilli afirmassem (na grande maioria dos casos, sem grande convicção) que o calor está relacionado com o movimento das partículas, prevaleceu a ideia de que o calor é um fluido- o *calórico*, que transita espontaneamente dos corpos quentes para os frios.

Com os trabalhos cruciais de Benjamim Thompson, Conde de Rumford, a ideia de calor associado ao movimento das partículas de um corpo impôs-se totalmente à ideia de calor- substância. As citações anteriores, porque se referem a obras muito posteriores aos trabalho de Thomson, traduzem essa ideia de calor-movimento. Com o progresso da energética, o calor passou a ser considerado uma forma importante de energia, a «energia molecular de um corpo», embora nos finais do século passado ainda prevalecesse a ideia de que se tratava de um movimento associado ao éter, como aliás vemos claramente na afirmação de Langlebert que transcrevemos.

O desenvolvimento da Termodinâmica levou a que se considerasse o calor como uma grandeza «função de linha » e não «função de ponto» (δQ é um pfaffiano e não uma diferencial exacta) pelo que não podemos falar em «calor como energia de um corpo». No entanto, esta concepção alternativa, nascida a partir da ideia de «calor-movimento» (que transparece nas frases atrás citadas), manteve-se, e, ainda hoje, muitos professores continuam a possuí-la e a transmiti-la aos seus alunos.

A concepção alternativa de que o calor é algo que está contido nos corpos e que ainda hoje persiste em muitas mentes, resulta, pelo que nos foi dado verificar, de uma extrapolação do modelo calor-movimento associada ao paradigma do éter e que se arrastou, pelo menos até ao final da primeira década do nosso século (Valadares, 1994, p. 36). (12).

A concepção alternativa de que a «*radiação é uma forma de propagação do calor*» (transparece claramente na última das citações anteriores), bem como a confusão suscitada pela palavra aquecimento, têm também raízes históricas. Quando um corpo é exposto à luz solar, ou quando é friccionado ou martelado por outro, ele aquece. Porém, isso não significa que a radiação solar ou o trabalho realizado sobre o corpo tenham de ser considerados como formas de calor. Os cientistas falavam muitas vezes em calor com o significado de luz e em luz com o significado de calor.

Por exemplo, Lambert, em 1777, estendeu as leis da propagação, da reflexão e da refração da luz ao calor e Rochou, em 1783, estendeu ao calor os fenómenos de difracção da luz. Falavam em raios caloríficos quando as experiências que executavam envolviam raios luminosos. Um conhecido físico, Della Porta (1535-1615) afirmava o seguinte: “*é curioso observar que o frio se reflecte no espelho tal como o calor*” (Schurmann, 1946, p.189). Um outro físico, Jamin, em 1869, falava em “*calores vermelho, amarelo, etc.*” (Caldeira e Martins, p.88).

O Conde de Rumford, o mesmo que mostrou que o calor tinha de estar relacionado com o movimento das partículas (e não com um fluido), defendia também que o chamado «calor radiante» se propaga no vazio (Schurmann, 1946, pág.41). Esta contradição é histórica: **se o calor resulta do movimento das partículas materiais, e se no vazio não há partículas materiais, como poderá o calor propagar-se no vazio?**

As concepções alternativas acerca da *energia* também ilustram de modo evidente as raízes históricas desse tipo de concepções. É o caso, por exemplo, da *conotação causal atribuída à palavra energia*, que transparece em muitas afirmações contidas em livros escolares (4.6.4.1).

Desde os tempos da Filosofia Natural que os pensadores procuram as causas do movimento. Foi na senda das causas do movimento que surgiram as concepções de «*horror ao vazio*», «*ímpeto*», «*força viva*» e «*energia vital*».

A força é, na Física do século passado e, em grande parte, na do nosso século, «*a causa do movimento e das deformações dos corpos*». Mas **esta ideia de força, como causa do movimento, estava em contradição com a ideia de inércia, segundo a qual, um corpo se move por si mesmo, sem ser preciso «a causa» - a força.**

A ideia de *peso aparente* que tantos livros continuam a adoptar (secção 4.6.2.2) arrasta-se também ao longo do tempo. Porquê aparente? Não é esse o peso que se mede? **Não será paradoxal o facto de ser aparente o peso que se mede e real o peso que não se mede?** A noção de peso aparente assenta no absolutismo da Física newtoniana onde há um referencial privilegiado relativamente ao qual as grandezas são consideradas absolutas, verdadeiras, autênticas.

Um outro exemplo da analogia entre as concepções alternativas dos professores e as concepções históricas é a *noção de Helsdon* de força. Esta concepção constitui um retorno à ideia aristotélica de queda livre como movimento natural. Para Helsdon, tal como para Aristóteles, uma pedra em queda livre cai com movimento natural sem que nele actue qualquer força (secção 4.6.1).

1. Muitos professores «caem» em concepções alternativas de índole histórica

Na pesquisa que efectuámos com professores de Física (Valadares, 1994, pp. 79 a 90), tivemos oportunidade de verificar como muitos deles, independentemente da sua experiência e da sua formação académica, revelavam a presença de ideias, geocêntricas e antropomórficas, próprias da Filosofia Natural pré-galilaica.

Assim, face ao movimento de um sinal luminoso emitido pela antena de um foguetão, movendo-se a velocidade relativista sobre um referencial terrestre, e solicitados a analisar esse movimento *do ponto de vista do referencial foguetão*, raciocinaram como *observadores terrestres*.

Em diversas respostas, surgiram determinados raciocínios baseados numa teoria surgida nos finais do século passado, a *teoria da emissão*, com que alguns cientistas procuraram interpretar as experiências de Michelson-Morley no quadro conceptual da Física newtoniana (Valadares, 1994, p. 84).

Muitas abordagens do tema *inércia de um corpo* acabam por conter, implicitamente, a ideia histórica de que se trata de algo intrínseco do corpo que constitui uma espécie de «força interna» que se opõe à alteração do repouso ou do movimento de um corpo. Trata-se de uma ideia histórica porque ela surgiu, em várias versões, ao longo do desenvolvimento do conhecimento físico. Essa tradição enraizou-se na cultura popular. Assim é ainda hoje frequente ouvir-se falar que um corpo, seja um carro ou um berlinde, tem dificuldade em parar, continuando a mover-se ao longo de um trajecto excessivo, porque vem cheio de «força».

Certos tipos de abordagens do tema *inércia* não contribuem para esclarecer os alunos acerca dessa propriedade dos corpos. Vejamos um exemplo que foi e ainda é, na sua essência, adoptado por muitos professores (manual XIV, p. 57).

Consideremos um vagão carregado do caminho de ferro em repouso em carris horizontais. Para pôr em movimento o vagão é necessário recorrer a uma força enorme, à força resultante das forças musculares de diversos homens, por exemplo. Para depois o manter em movimento basta a força de um ou dois homens.

Esta abordagem costuma ser feita *à margem de quaisquer referências à actuação de forças exteriores resistentes*, tais como a força de atrito e a resistência do ar, pelo que conduz a que os alunos admitam a existência, em lugar dessas forças, de uma força resistente do corpo sobre ele próprio, que se opõe à acção da força aplicada.

A definição que depois é apresentada, quase sempre a de *que a inércia é uma resistência do corpo à variação de velocidade*, ainda vai reforçar mais essa ideia incorrecta, já que os alunos associam a palavra «resistência» à palavra «força», pois essa associação aparece muitas vezes no ensino da Física.

4.7.2 A persistência das concepções alternativas nos professores

Ao analisar as concepções alternativas dos alunos, afirmámos que elas possuem um carácter bastante persistente, resistindo imenso à mudança conceptual. Será que o mesmo sucede com as concepções alternativas que os professores ensinam? O que é que a análise que efectuámos dessas concepções, bem como a experiência de contacto com os professores, nos permitiu verificar?

Os exemplos apresentados na secção 4.6 afiguram-se-nos suficientes para mostrar que também os professores de Ciência (e não só os alunos) têm concepções alternativas que se revelam persistentes.

Na secção anterior referiu-se o facto de algumas concepções alternativas sobre o calor se propagarem ao longo do tempo.

Recordamos a persistência da noção de *«peso aparente»*. Esta noção tem sido ensinada de geração em geração e ainda hoje é transmitida aos alunos (muitos deles serão futuros professores), apesar de ter decorrido quase um século desde que foram abolidos os conceitos de espaço absoluto, tempo absoluto e referencial absoluto.

Registámos também o facto de se manterem ao longo dos anos diversas concepções de peso que consideramos alternativas à concepção oficialmente aceite, que foi adoptada há décadas atrás (Almeida, 1988, p. 90) e que se revela mais satisfatória do que elas como veremos na secção 4.7.5.

Persiste em muitos livros a concepção de que *«a energia é a causa dos acontecimentos»*. A associação mecânica equilíbrio - energia potencial mínima conduz muitos professores a pensar que fenómenos espontâneos como a descida das montanhas pelos regatos e a queda da chuva estão relacionados com uma diminuição da energia potencial, o que implica a passagem a estados de maior estabilidade.

Ora a energia não é a causa de esses e de todos os outros fenómenos espontâneos ocorrerem desse modo. Sabemos bem que a lei fundamental da energia, a que traduz a sua conservação, não é uma lei da evolução dos sistemas naturais. Essa lei é a do aumento da entropia.

Vimos como se mantêm ideias confusas acerca das leis de Newton e como são transmitidas de geração em geração abordagens potencialmente geradoras de uma representação incorrecta da inércia.

Continua a insistir-se na «*massa relativista*», apesar de há mais de 50 anos Einstein se ter pronunciado a favor da sua inconsistência (Okun, 1989, Adler, 1981, Valadares, 1993).

A persistência nos livros de concepções inaceitáveis como a de que «*o calor é a energia total das moléculas em movimento nos corpos*» ou a de que «*a temperatura é uma medida da energia cinética média das moléculas*» são outros exemplos que mostram que as concepções alternativas dos professores são, à semelhança do que acontece com as dos alunos, altamente resistentes à mudança.

Para terminar esta secção, vamos dar um exemplo que ilustra bem a inércia conceptual que reina no domínio do ensino da Física.

Na prova de aferição da 1ª fase/1ª chamada do 12º ano de escolaridade de 1985 (Ponto 73) surgiram os seguintes dois problemas:

Problema II.2 - «Um satélite de massa 2000 kg descreve uma órbita de raio igual a 9000 km em volta da Terra com velocidade de módulo constante. Calcule:

2.1 O trabalho que seria necessário realizar para afastar o satélite até uma distância infinita da Terra.

2.2 A grandeza do momento angular do satélite, suposto um ponto material, em relação ao centro da Terra.»

Problema III .1 - « Num autocarro que transporta alunos para uma Escola, um deles prende por um fio, ao encosto de um dos bancos, um balão de massa desprezável e volume V , cheio de um gás mais leve que o ar. Em dado momento, repara que o fio deixa de estar vertical, afastando-se dele no sentido do movimento, de modo a formar um ângulo de 45° com aquela direcção.

1.1 Indique, justificando, se o condutor acelerou ou travou nesse momento.

1.2 Calcule a grandeza da aceleração, sabendo que as massas volúmicas do ar e do gás são, respectivamente, $\rho = 1,293 \text{ kg / m}^3$ e $\rho' = 1,00 \text{ kg / m}^3$ »

O ponto vinha acompanhado de soluções e cotações. Porém, as soluções destes dois problemas estavam incorrectas. Assim:

No primeiro problema não se tinha em conta a energia cinética do satélite, em movimento na órbita inicial, considerando-se o trabalho exterior igual à variação da energia potencial quando, na realidade esse trabalho é igual à variação da energia mecânica total (admitindo não haver dissipações).

Assim, admitindo que se pretende o trabalho mínimo (corresponde a o satélite ficar em repouso à distância infinita), temos

$$W = E_{mf} - E_{mi} = (0 + 0) - \left(\frac{1}{2} G \frac{mM}{r} - G \frac{mM}{r} \right) = \frac{1}{2} G \frac{mM}{r}$$

enquanto a solução oficial era

$$W = E_{pf} - E_{pi} = \left[0 - \left(-G \frac{mM}{r} \right) \right] = G \frac{mM}{r}$$

o que dá o dobro da energia necessária.

No segundo problema não se tinha em conta o facto de o balão ser constituído por um gás menos denso do que o ar, raciocinando-se como se ele fosse um pêndulo simples com uma esfera mais densa do que o ar.

Assim, a «**resposta oficial**» à alínea 1 era a de que «*se o balão se afastou da vertical no sentido do movimento (foi para a frente) é porque o autocarro travou*», enquanto que a **resposta correcta** é que «*se o balão se afastou da vertical no sentido do movimento (foi para a frente) é porque o autocarro acelerou*». Quanto à alínea 2, a «**resposta oficial**» era $a = \frac{\rho - \rho'}{\rho'} g$ enquanto a «**resposta correcta**» é $a = g$ (Carlos, Martinho e Valadares, 1985).

O que importa aqui realçar é o facto de ter sido publicado na «*Gazeta de Física*», a revista de grande divulgação da Sociedade Portuguesa de Física junto dos professores de Física, pouco tempo depois da data da prova de exame, um artigo a apresentar as soluções correctas, com consequências praticamente nulas. Com efeito, os alunos que tinham respondido correctamente às questões não deixaram de ser penalizados por as suas respostas serem diferentes das oficiais. E, além disso, os livros que, de então para cá, se publicaram com a explicação das resoluções do referido ponto de exame (e de que temos conhecimento) continuaram a manter as «resoluções oficiais», portanto erradas (livro XII, pp. 117, 120 e 121 e livro XIII, pp. 150, 151 e 152).

4.7.3 *A homogeneidade e universalidade das concepções alternativas dos professores*

Ao aplicarmos o mesmo instrumento de pesquisa sobre a relatividade das grandezas mecânicas, a professores da mais variada experiência de ensino, estávamos à espera de encontrar diferenças substanciais no modo de raciocinar em torno das questões colocadas.

A **população** de professores que responderam às questões pode ser caracterizada assim:

- *Experiência* de ensino muito variada:

Almada: 23 professores; *Lisboa*: 30 professores

	1-5 anos	5-10 anos	10-15 anos	15-20 anos	20-30 anos	30-40 anos
1 nível						
2 níveis	1	1		1	1	
3 níveis	2		1	1		
4 níveis		2	2 3	1 7	1	
5 níveis		2 4	3 1	6 2	2 7	2

- *Formação académica* também muito variada:

Almada: 23 professores; *Lisboa*: 30 professores

Físico-Químicas	Física	Química	Eng. Química	Farmácia
1 + 11	4 + 1	6 + 12	11 + 6	1 + 0

Ainda que soubessemos que as concepções alternativas dos alunos têm um carácter universal e homogéneo, ficámos surpreendidos quando verificámos que *também nos professores as variáveis área geográfica, formação académica e experiência de ensino não influenciaram de modo significativo os tipos de respostas e os respectivos resultados, quer qualitativa quer quantitativamente* (Valadares, 1994, p. 81).

Observe-se, a título de exemplo, o seguinte quadro que foi extraído do artigo referente à pesquisa por nós efectuada, no âmbito deste trabalho (Valadares, 1994, pp. 79 a 90 e Apêndice 1):

Almada: 23 professores ; *Lisboa*: 30 professores ; *Brasil*: 24 estudantes

	SR	GR	S _p K	N _A	N _L	N _P	N _B
T _B B<T _B D	R	A	A	19	29	48	20
T _B B=T _B D	A	R	R	4	0	4	4
T _B B>T _B D	R	R	R	0	0	0	0

Legenda do quadro:

SR = Modelo da Relatividade Restrita;
 GR = Modelo da Relatividade de Galileu;
 S_pK = Modelo de cinemática espontânea;
 R = O modelo rejeita a opção;
 A = O modelo admite a opção.

Tratava-se de *comparar as distâncias percorridas por dois sinais luminosos, B e D, emitidos por uma antena em sentidos opostos, em relação a um passageiro que segue num comboio, T_B, no sentido do sinal luminoso B.*

Exigia-se uma mudança do referencial Terra para o referencial T_B. À semelhança do que sucedeu com as respostas dadas por estudantes brasileiros de pós-graduação (comparem-se as colunas referentes aos estudantes brasileiros -N_B, professores de Almada - N_A e professores de Lisboa - N_L) as respostas dos professores portugueses foram na sua quase totalidade incompatíveis com a relatividade einsteiniana (dos 52 professores que apresentaram resposta, 48 responderam que o sinal B está mais perto).

As justificações apresentadas, na sua grande maioria, relativisavam a velocidade da luz, considerando implicitamente que o referencial terrestre é um referencial absoluto privilegiado. Quase todas as respostas foram muito semelhantes a esta:

"O sinal B está mais perto, porque o sentido do seu movimento é o mesmo do veículo T_B onde viajo."

Ao analisarmos as comunicações de que tomámos conhecimento sobre concepções alternativas de professores primários e professores em formação, acerca do mesmo tema, verificámos como eles, independentemente da sua origem e formação, possuem concepções alternativas análogas. Por exemplo, Summers (1992, pp. 25 a 40) e Galili (1993, pp. 149 a 162) confirmaram a existência da mesma concepção alternativa acerca das «forças passivas» em professores primários e em formação de diferentes países.

Mais adiante, a propósito das origens das concepções alternativas dos professores, teremos oportunidade de apresentar outros exemplos que fundamentam a homogeneidade e universalidade dessas concepções alternativas.

4.7.4 As concepções alternativas dos professores surgem muitas vezes escondidas por trás da linguagem técnica

Na pesquisa que efectuámos com professores sobre a relatividade das grandezas mecânicas, detectámos concepções alternativas baseadas numa cinemática espontânea, escondidas por trás do uso de fórmulas de composição de velocidades coerentes com a relatividade de Galileu (Valadares, 1994, pp. 83 e 85).

No estudo que efectuámos acerca das concepções alternativas no domínio da Teoria da Relatividade pudemos também verificar que a ideia de *massa relativista* como «*medida da inércia de uma partícula a alta velocidade*» é um exemplo sugestivo de uma concepção alternativa que se esconde por trás de uma linguagem técnica, tal como vamos procurar mostrar.

Como sabemos, a fim de tornar válida, em todas as colisões, a lei da conservação do momento linear, torna-se necessário reformular a noção de momento linear da Física Clássica.

Impõe-se então à nova definição do momento linear, $\vec{p}$, duas condições:

- que se conserve nos choques;
- que tenda para a definição clássica $\vec{p} = m\vec{v}$ quando o valor da velocidade v se aproxima de zero, e, portanto, o quociente v/c tende para zero.

Analisa-se então um choque elástico de duas partículas em dois referenciais movendo-se um em relação ao outro com uma velocidade constante. Após algum tratamento formal, chega-se à conclusão que a nova definição de momento que satisfaz as duas condições é

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

para uma partícula movendo-se à velocidade $\vec{v}$ e que, quando em repouso ou em movimento lento, tem a massa m .

Chegados aqui, podemos assumir dois pontos de vista alternativos acerca da massa da partícula que se move à velocidade $\vec{v}$:

- Um deles é continuar a pensar em termos clássicos no momento linear como o produto de uma grandeza numérica, que traduz a inércia da partícula, pela velocidade, e considerar que a massa da partícula não mais é independente da velocidade, sendo dada pela expressão

$$m_r = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

em que m_r é a chamada massa relativista.

- Outro ponto de vista é considerar que a massa continua a ser m e é o factor relativista afecta apenas a velocidade (grandeza eminentemente relativa, como sabemos) e não a massa da partícula. Nesta segunda concepção, a massa da partícula não muda de referencial para referencial, muda apenas com a energia intrínseca da partícula.

As experiências parecem ter confirmado a primeira concepção desde muito cedo. Com efeito, já em 1909, isto é, 4 anos decorridos sobre a publicação do trabalho original de Einstein sobre a Teoria da Relatividade Restrita, Bucherer declarava ter verificado o aumento da massa com a velocidade, utilizando a conhecida equação

$$r = \frac{mv}{qB}$$

que dá o raio da trajectória seguida por partículas com carga eléctrica q quando penetram num campo magnético uniforme $\vec{B}$ perpendicularmente a este campo (Sears e Zemansky, 1964, p. 781, Resnick e Halliday, 1985, p. 105).

Bucherer utilizou electrões provenientes do declínio β de partículas radioactivas e mostrou que os resultados eram consistentes com a expressão

$$r = \frac{mv}{qB\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Esta e muitas outras experiências similares levaram a que se pensasse que estávamos perante uma variação da inércia das partículas traduzida pela grandeza

$$m_r = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Afinal, uma partícula a alta velocidade comporta-se como tendo uma grande inércia (tendência para manter a sua velocidade) já que uma grande força produz uma pequena aceleração nela. E a fórmula da massa relativista proporciona uma «interpretação» sedutora: se $v \rightarrow c$, então $m_r \rightarrow \infty$.

Não admira, portanto, que dois autores consagrados, Sears e Zemansky, tenham afirmado no seu curso de Física (que influenciou muitos físicos e autores de livros de Física) que a equação da massa relativista *“foi verificada experimentalmente com electrões e iões de grande velocidade. O acréscimo de massa torna-se apreciável apenas para velocidades próximas da da luz, motivo pelo qual escapa normalmente à observação”* (1963, p. 170).

Tal não é verdade. O que sempre se verificou até hoje com todas as partículas aceleradas até atingirem velocidades próximas da luz é uma significativa dilatação temporal do tempo relativista que torna mais morosa a variação de velocidade, criando a ilusão que a inércia das partículas aumenta com a velocidade (Adler, 1987, p. 740, Alcaine, 1989, p. 60, Valadares, 1993, pp. 15 e 16).

Vemos, assim, como a concepção alternativa de que a massa relativista mede a inércia se esconde atrás de um formalismo logicamente correcto e até aparentemente confirmado pela experiência.

4.7.5 Nas concepções alternativas dos professores existem incoerências que lhe transmitem uma falta de consistência

Vimos (secção 4.6.1) como, a partir de uma aparente incoerência entre as concepções estática e dinâmica da força na Mecânica newtoniana, Helsdon propôs uma concepção alternativa à ideia newtoniana de força. Mas vimos, também, como essa outra concepção caiu em contradições internas maiores do que as que procurou resolver, ao introduzir o conceito de aceleração em relação à queda livre.

Entre as inúmeras definições que foram propostas para o peso, há algumas que deixam transparecer facilmente as incoerências lógicas que contêm. Analisemos, por exemplo, a seguinte definição de Cox a que atrás nos referimos (4.6.2.1)

Peso de um corpo é “*a grandeza, expressa em newtons, que indica quão pesado o corpo é*”.

Então se um peso estiver expresso em unidades do antigo sistema métrico gravitatório já deixa de ser um peso?

E que significará, para o professor Cox, um corpo ser mais ou menos pesado? Depreende-se que será a indicação maior ou menor de um dinamómetro, graduado em newtons, portanto o peso ser maior ou menor.

Estamos, assim, num perfeito ciclo vicioso: maior (menor) peso porque o corpo é mais (menos) pesado; o corpo é mais (menos) pesado porque o peso é maior (menor).

O mesmo professor define a massa de um corpo de um modo ainda mais insustentável:

Massa de um corpo é a “*medida do número de partículas que nele existem*”.

Ficaria satisfeito o professor Cox se um aluno lhe afirmasse que a massa de um bloco de ferro é 6×10^{23} átomos de ferro? Qual é a unidade? Então a Teoria da Relatividade Restrita está errada e a massa de um corpo não depende da sua energia?

Analisemos agora esta outra definição do professor Allen King (4.6.2.1), que é também a de alguns autores consagrados como Jay Orear (1971, p. 78):

Peso de um corpo é a “*força exercida pelo corpo no suporte a que está ligado*”.

E se o corpo estiver ligado, como tantas vezes sucede a dois ou mais suportes? Claro que este problema é ultrapassável, bastando uma ligeira correcção da definição. Porém uma outra deficiência permanece: é que o peso de um corpo passa a ser uma força que não está aplicada no corpo. Se se trata de uma força de acção do corpo num suporte, não é muito menos ambíguo chamar-lhe isso mesmo: força de acção no suporte? Esta designação não admite dúvidas ao contrário da designação de peso para uma tal acção.

A nossa experiência permitiu-nos verificar que os alunos têm dificuldade em aceitar que o peso de um corpo seja uma força aplicada noutro corpo a que ele está ligado. Costumam, invariavelmente, colocar a questão da não existência de ligações do corpo. E cai-se, assim, na situação, também polémica, da imponderabilidade.

O conceito de **peso** como **força exercida pelo campo gravítico terrestre** tem um valor limitado. Em primeiro lugar só vale para os corpos terrestres, mas esta dificuldade é facilmente ultrapassável, se substituirmos o campo gravítico da Terra pelo do astro próximo do corpo cujo peso estamos a considerar.

Porém, outra dificuldade persiste relativamente à definição anterior. É que uma tal definição, para não conduzir a qualquer ambiguidade, exige que nos situemos na posição de observador de inércia. Ora, sabemos que a Terra (assim como qualquer outro astro) não é um referencial de inércia. Mas também sabemos que a pequena aceleração do referencial terrestre conduz a um desvio insignificante (cerca de 0,1 %) entre a força gravitacional exercida num corpo em repouso e a força que medimos quando ligamos o corpo a um dinamómetro.

O problema maior surge ao passarmos à condição de observador «razoavelmente» acelerado (e hoje isso sucede-nos muitas vezes). Nessas condições, já a força gravitacional num corpo é bastante distinta da acção que medimos ao ligar o corpo a um dinamómetro. E agora, que fazer, mantemos a definição e deixamos de considerar o dinamómetro como instrumento capaz de medir o peso, ou, para

manter a possibilidade de determinar o peso com o dinamómetro, abandonamos essa definição?

A ideia da existência de um *peso verdadeiro* e um *peso aparente* é insustentável do ponto de vista epistemológico, pois é contrário ao 8º princípio fundamentado no capítulo anterior, segundo o qual *a validade do conhecimento é normativa e não axiológica*. A aceitação de que a validade do conhecimento assenta na coerência e poder interpretativo de um modelo e não numa pretensa verdade acerca dos fenómenos leva-nos a rejeitar ideias como as de peso verdadeiro e peso aparente. O peso como força gravítica é verdadeiro porquê? O peso lido no dinamómetro resulta então aparente porquê? Só porque não se identifica com um outro pesunçosamente considerado verdadeiro?

O conceito de **imponderabilidade**, associado ao estado de queda livre, ao ser depois introduzido nos livros de Física após tantas e tão incoerentes noções de peso, só pode ter a consequência que tem tido: lançar a confusão nos alunos. Alguns alunos são colocados perante **corpos que têm peso e estão em imponderabilidade** (palavra que significa etimologicamente ausência de peso....) e outros são confrontados com situações de **corpos que sem estarem em imponderabilidade não têm peso**. Basta, para que aconteça a primeira incoerência, que o professor defina peso como a força gravitacional num corpo e o corpo esteja em queda livre. É suficiente, para que a segunda situação ocorra, que a definição seja a mesma e o corpo esteja num ponto onde as forças gravíticas que actuam se equilibrem...

Se a primeira definição de peso do quadro atrás apresentado (4.6.2.2) é criticável, a segunda não o é menos. Com efeito a definição de **peso como causa da aceleração da gravidade**, igual ao produto da massa do corpo pela aceleração da gravidade, tem os inconvenientes da definição anterior e ainda outros.

Com efeito, para além do aspecto causal, que é epistemologicamente criticável, tem o inconveniente de referir uma aceleração considerada absoluta, o que não é verdade no caso dos referenciais acelerados.

A terceira definição de **peso** apresentada no quadro apresentado em 4.6.2.2, como **produto da massa pela aceleração de queda livre medida no referencial do observador**,

$$P = m g'$$

é a única que consideramos coerente e tem a nossa preferência. Os argumentos com que a defendemos são os seguintes:

1º - É a definição que está de acordo com a Conferência Geral de Pesos e Medidas (Almeida, 1988, p. 90; Keller et al., 1993, p. 99).

2º - Confere ao peso um carácter relativo, tornando-o dependente do referencial onde é medido, o que não só está de acordo com a experiência de medição de pesos como também com a posição epistemológica correcta face ao conhecimento físico actual.

3º - Corresponde ao valor do peso lido por um observador qualquer num dinamómetro ligado ao referencial do observador.

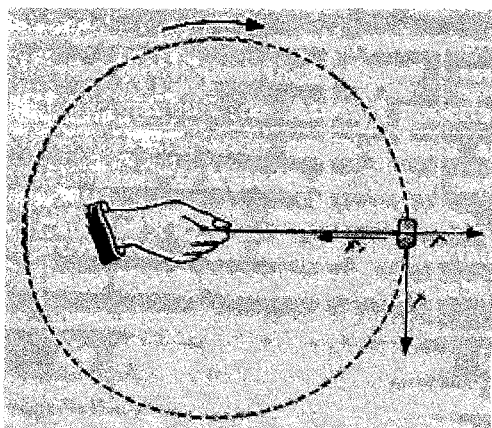
4º - É mais geral que as definições anteriores, sendo estas casos particulares válidos nos referenciais a que dizem respeito. Assim, a primeira definição do quadro atrás apresentado (4.6.2.2) refere-se ao caso em que o referencial está fixo na Terra e a rotação desta se despreza. A segunda definição do mesmo quadro refere-se ao caso em que o referencial onde se efectua a medição está em repouso na Terra móvel.

E mesmo esta definição não está completamente isenta de críticas. Tem, quanto a nós, o inconveniente de corresponder a uma definição dinâmica, quando o peso é sistematicamente medido através de uma situação estática. (13) .

A análise que acabamos de fazer mostra as inconsistências que poderão ocorrer em representações de grandezas fundamentais como são a de peso e massa. Vamos agora apresentar outro exemplo de inconsistência, desta feita na representação de um fenómeno trivial: o movimento circular.

Um manual por onde estudaram milhares de alunos, muitos dos quais são actualmente professores de Física, apresenta do seguinte modo as forças no movimento curvilíneo (livro XIV, p. 390):

“Quando um veículo muda bruscamente de direcção, como acontece, por exemplo, quando faz uma curva fechada, os corpos nele contidos sofrem a acção de uma força, que tende a projectá-los para fora. Todos temos sentido os seus efeitos .Para estudarmos esta força atemos uma pedra numa das extremidades de um fio, e façamo-la girar em volta da mão (ver figura)



“Força centrífuga - À força *centrípeta*, F' , que solicita a pedra para o centro, opõe-se uma reacção, a força *centrífuga*, F , que tende a desviá-la do centro.”

Se, enquanto a pedra gira, largarmos a outra extremidade do fio (como acontece no uso de uma funda), veremos a pedra seguir em linha recta, numa direcção tangencial. O movimento rectilíneo da pedra prova que era a força de atracção continuamente exercida pelo fio, sobre a pedra, que mantinha esta na sua trajectória circular, impedindo-a de seguir a direcção tangencial.

Temos de admitir, por isso, a existência de duas forças: uma tangencial, T , devida à impulsão, que lhe comunicamos, a qual, se actuasse isoladamente, imprimiria à pedra um movimento rectilíneo e uniforme; outra, F' , aplicada à pedra com auxílio do fio, que a solicita constantemente para o centro da circunferência descrita. Esta última chama-se força centrípeta (L. centrum-petere: dirigir-se para o centro).

Mas se, apesar desta força centrípeta, F' , que constantemente a impele para o centro, a pedra se mantém na trajectória circular, é porque o corpo se opõe, em virtude da inércia, a ser desviado da trajectória rectilínea.

É por isso que, durante o movimento, o fio fica tenso, e sentimos na nossa mão uma força de tracção dirigida para fora.

Esta reacção do corpo, cujo efeito é afastá-lo do centro de rotação, chama-se reacção centrífuga ou força centrífuga (L. centrum-fugere: desviar-se do centro).”

Esta abordagem encerra, em si, tais contradições internas, que é potencialmente reforçadora de concepções alternativas dos alunos absolutamente inaceitáveis do ponto de vista científico. Senão vejamos:

A força $\vec{T}$ não existe, pois não resulta de qualquer interacção nem é uma força de inércia. Além disso, ao contrário do que o autor afirma, essa força, caso existisse e actuasse isoladamente imprimiria um movimento não uniforme. O autor está a cair nitidamente na concepção alternativa «o movimento implica força» (4.2.1.1).

Por outro lado, há uma mistura confusa de descrições em referenciais diferentes. Senão vejamos. No referencial Terra (considerado como referencial inercial), a força centrífuga representada, $\vec{F}$, não existe. Na pedra actua apenas a força centrípeta, $\vec{F}'$ que lhe imprime uma aceleração centrípeta. De acordo com a lei da acção-reacção, actua uma reacção centrífuga, mas não na pedra: actua no fio. Se as forças que o autor considera aplicadas na pedra actuassem, de facto, nela, o movimento da pedra seria rectilíneo acelerado e não circular.

E, na pedra, não actua qualquer força centrífuga? Do ponto de vista do **referencial Terra**, considerado **inercial**, a resposta é não.

Podemos considerar, em *alternativa*, um **referencial intrínseco da pedra**, ligado a ela. Trata-se, agora, de um **referencial acelerado**. Neste referencial a pedra está em repouso. Como explicar fisicamente esse repouso nesse referencial? Considerando, então sim, uma **força centrífuga de inércia** a actuar na pedra.

Tem havido concepções diferentes, em Física, acerca «do estatuto» das forças de inércia. Mas a isso referir-nos-emos quando tratarmos das concepções alternativas na própria Física.

4.8 Origens das concepções alternativas dos professores

Ao analisarmos a natureza da Ciência, particularmente da que nos proporciona o conhecimento do mundo físico, vimos que ela não tem como pretensão o conhecimento pleno desse mundo, pelo que uma margem de erro e incerteza está inerente a esse conhecimento.

Os professores, como qualquer outro ser humano, constroem o seu conhecimento, e nem sempre essa construção conduz a representações correctas acerca dos fenómenos e dos objectos físicos, como aliás acabámos de ver.

Tal como fizemos ao analisar as origens das concepções alternativas dos alunos, vamos explorar, em separado, vias predominantemente histórico-epistemológicas, outras fundamentalmente psicológicas e ainda outras eminentemente sociológicas.

Começemos por considerar o **aspecto histórico-epistemológico**.

Os diversos estudos de que tomámos conhecimento acerca das representações dos professores apontam para o facto de também revelarem, a exemplo do que sucede com as representações dos alunos, algum paralelismo com as concepções que prevaleceram em estádios diferentes da evolução da Ciência. Para indagar acerca desta e de outras possíveis características das concepções alternativas dos professores, procedemos a uma pesquisa centrada no tema «**relatividade das grandezas mecânicas**» (Valadares, 1994, pp. 79 a 90 e Apêndice 1 a este trabalho). Para facilitar a análise das respostas dos professores ao questionário que lhes foi distribuído, começámos por caracterizar três grandes fases da evolução das ideias acerca desse tema:

Uma **fase pré-galilaica**, caracterizada por representações próximas das do senso comum, ainda pouco filtradas por um *espírito científico moderno* que, como já dissemos, surgiu na época de Kepler, Galileu e Descartes. No que respeita às grandezas mecânicas, essa fase caracteriza-se por raciocínios em que:

- o movimento não é discutido em termos relativos, sendo privilegiado o referencial terrestre onde se situa o ser humano que tem o privilégio de aceder aos valores «reais», «próprios», «autênticos» ou «verdadeiros» acerca do movimento;
- a velocidade da luz é espontaneamente e acriticamente considerada infinita;
- há uma velocidade privilegiada, a «autêntica» ou «verdadeira», e que é aquela que se refere ao espaço terrestre, que assume um carácter absoluto;
- se considera espontâneamente um evoluir do tempo com carácter absoluto;
- as distâncias espaciais são absolutas;

- as distâncias percorridas e trajectórias medidas pelo observador terrestre assumem um carácter absoluto, «autêntico», «verdadeiro», sendo todas as outras distâncias e trajectórias consideradas como a consequência de movimentos aparentes.

Uma **fase galilaica** caracterizada por representações que ainda não ferem o senso comum mas já afastadas algo dele, «filtradas» pelo *espírito científico moderno* que conduziu aos trabalhos notáveis de Kepler, Galileu, Descartes, Newton, Huygens, etc. Essa fase caracteriza-se por raciocínios em que:

- já existe, para cada movimento estudado, uma escolha de um referencial inercial conveniente (seja ele o referencial terrestre ou o referencial solar ou o referencial das estrelas fixas), mas considerando ainda a existência de um referencial privilegiado- o referencial absoluto do éter em que a luz tem a mesma velocidade em todas as direcções;
- se considera a velocidade da luz constante em todas as direcções no referencial absoluto do éter, e em que nas representações dos movimentos se despreza o carácter finito dessa velocidade;
- as velocidades nos referenciais móveis são consideradas relativas;
- o tempo é absoluto e, portanto, os intervalos de tempo são iguais em todos os referenciais;
- as distâncias espaciais entre pontos têm um carácter também absoluto;
- as distâncias percorridas e trajectórias são relativas, mas essa relatividade decorre da relatividade das velocidades e não dos tempos de percurso;

- as fórmulas de transformação de Galileu formalizam a mudança da descrição de um referencial de inércia para outro.

Finalmente, e já no nosso século, surgiu uma **fase einsteiniana**, com representações que ferem o senso comum, o produto de um *espírito científico ultramoderno* e de quatro séculos de uma dialéctica científica construtiva. Esta fase caracteriza-se por raciocínios em que:

- se escolhe, para cada situação física, um referencial inercial conveniente, mas sem privilegiar qualquer referencial inercial em relação aos outros, pelo que o referencial absoluto é abolido;
- a velocidade da luz é finita e tem o mesmo valor em todas as direcções e em todos os referenciais;
- as restantes velocidades são todas relativas;
- o tempo é relativo a cada observador, sendo maior o intervalo de tempo de um fenómeno medido por um observador em movimento do que o intervalo de tempo do mesmo fenómeno medido por um observador em repouso;
- as distâncias espaciais entre pontos são relativas, com uma diminuição das mesmas quando observadas em movimento;
- as distâncias percorridas pelas partículas e as respectivas trajectórias são relativas, decorrendo esta relatividade quer das velocidades quer dos tempos de percurso;
- as fórmulas de transformação de Lorentz são utilizadas para passar de uma descrição válida num referencial de inércia para outra descrição válida num outro referencial de inércia.

Nesta pesquisa que efectuámos com professores (Apêndice 1), mais do que verificarmos as respostas dos professores às questões que lhes foram colocadas, analisámos o tipo de raciocínio que eles utilizaram. E que concluímos?

Que os professores, independentemente da sua experiência, utilizaram raciocínios que se enquadram perfeitamente, quanto às suas características, nos três estádios históricos.

Quer dizer: confirmou-se de modo inequívoco a existência de um paralelismo entre as concepções alternativas dos professores e as concepções históricas.

Esse paralelismo foi ao ponto de até se terem detectado raciocínios absolutamente análogos aos dos adeptos da teoria da emissão (Ibidem, p. 84), tal como se esses professores, a exemplo do que fizeram determinados cientistas, estivessem a tentar enquadrar os novos dados relativistas no quadro conceptual da Física clássica, mais intuitiva e conforme com o senso comum.

O conhecimento que agora possuímos sobre o pensamento dos professores de Física acerca dos fenómenos naturais permite-nos afirmar que eles caem, à semelhança do que sucede com os alunos, em representações intuitivas, enraizadas no senso comum, que se afastam das concepções científicas.

Este facto será encarado epistemologicamente como natural, se admitirmos a validade do princípio do isomorfismo na construção do conhecimento científico, assente na natureza desse conhecimento.

Se partirmos do princípio que os mecanismos de construção do conhecimento pelos professores e pelos alunos são idênticos, se aceitarmos que todos os seres humanos constroem idiossincrasicamente o seu próprio conhecimento, que essa construção assenta no mesmo tipo de relação sujeito-objecto já por nós discutida, que a influência de diversos factores, psicológicos e sociológicos, se faz sentir em todos eles, então é de esperar que haja características e origens semelhantes nas concepções alternativas dos professores e dos alunos.

Os professores, tal como os alunos, estão sujeitos a crenças e convicções metafísicas que influenciam o seu pensamento.

Levantam-se aos professores, tal como se erguem aos alunos, as barreiras produzidas pelo pensamento espontâneo ao pensamento científico, de acordo com o princípio epistemológico de Bachelard, já várias vezes referido.

Também é natural que os professores que apuraram o seu espírito científico, tendo um acesso mais fácil ao pensamento autocrítico, acabem por conseguir mais facilmente desprender-se de crenças e dogmatismos, modificando as suas próprias ideias.

Um conceito é construído com base na descoberta de regularidades encontradas nos objectos e nos fenómenos, feita à custa de outros conceitos interligados em teorias. O conceito acaba por se enquadrar num determinado quadro conceptual, e este torna-se decisivo para o modo como ele é apreendido por cada indivíduo. A **não existência de um quadro conceptual bem definido** deverá, então, estar também na origem de inúmeras concepções alternativas. Ora um quadro conceptual bem definido pressupõe a definição clara à partida do **sistema em estudo** e a existência de um **referencial**, prévia e claramente assumido.

Vimos um exemplo que apoia esta tese da importância do quadro conceptual a propósito do conceito de peso. Podemos dar outros exemplos.

Consideremos a vulgar experiência do calorímetro de Joule. Um professor afirma aos alunos que o que sucede nessa experiência é uma transferência de energia por fluxo calorífico. Outro professor, ao analisar a mesma experiência, afirma que há uma transferência de energia através da realização de um trabalho eléctrico. A que se deve esta divergência?

Ela deve-se, certamente, ao facto de nem um nem outro terem definido qual é o sistema em estudo. Com efeito, há várias conjecturas possíveis e cientificamente correctas, dependendo daquilo que pertence ao sistema e ao exterior. Assim:

- Se o sistema for apenas o gerador, este fornece energia ao exterior a que pertence o fio através da realização de um trabalho realizado pelas forças do campo eléctrico sobre as cargas.
- Se o fio ainda pertence ao sistema mas a água e o vaso calorimétrico continuam a fazer parte do exterior, então a energia é transferida do fio (no sistema) para a água (no exterior) por meio de um fluxo de calor.
- Se a água e o vaso calorimétrico ainda pertencerem ao sistema e as paredes do vaso calorimétrico fechado puderem ser consideradas rígidas, opacas e adiabáticas, não há qualquer transferência de energia para o exterior, pois não há nem calor nem trabalho nem luz nem transferência de matéria envolvida. Assim sendo, ocorrerá tão só uma dissipação de energia no interior do sistema.

Vejamos um outro exemplo:

Consideremos uma partícula em movimento ascensional, uma esfera lançada verticalmente para cima, por exemplo.

Ao estudarem-se as transformações de energia que ocorrem, uma abordagem vulgar mas pouco correcta é a seguinte:

Há conservação da energia mecânica, logo

$$E_c + E_p = \text{constante}$$

Pela lei do trabalho-energia, o trabalho das forças que actuam é dado por

$$W = \Delta E_c$$

e, consequentemente, esse trabalho é simétrico da variação de energia potencial:

$$W = - \Delta E_p$$

Esta abordagem é confusa pois carece de, previamente, se definir com clareza qual é o sistema que estamos a considerar.

Com efeito, qual é o significado físico da equação $W = - \Delta E_p$?

Significa (atendendo à igualdade e ao sinal *menos*) que houve uma transferência de energia do exterior para o sistema (ou do sistema para o exterior) por meio da realização de um trabalho do exterior sobre o sistema (ou do sistema sobre o exterior) e a energia potencial do sistema diminuiu (ou aumentou), por esse facto, de uma igual quantidade.

Mas, como pode ter havido transferência de energia para o sistema (ou vice-versa) por meio da realização de um trabalho, se a energia mecânica se mantém? Então não se partiu da validade da expressão $E_c + E_p = \text{constante}$?

Concordamos com Bauman (1992, p. 267) que entende que a deficiência deste tipo de abordagens está na má utilização da lei do trabalho-energia, o que aliás é vulgar. Com a tendência em se enunciar e demonstrar a lei apenas em situações em que não são de considerar variações de energia potencial, acaba-se muitas vezes por aplicá-la indevidamente em situações em que há variação de energia potencial, como neste caso.

Como o trabalho realizado sobre um sistema mede a energia transferida para o sistema e, mesmo em sistemas mecânicos, há muitas vezes variação de energia potencial e não só de cinética, melhor seria abordar a lei em termos de energia mecânica e não apenas da sua componente cinética.

Porém, entendemos que **o maior problema reside na não definição de qual é o sistema em estudo**. Com efeito, se considerarmos o sistema conveniente e nos cingirmos às transformações energéticas que ele sofre, a abordagem torna-se clara e os possíveis erros são facilmente corrigidos.

Neste exemplo, se considerarmos como sistema a partícula, a equação $W = \Delta E_c$ pode utilizar-se e está correcta. O trabalho da força gravítica, a única força que actua na esfera (considerada como partícula) mede a variação de energia, neste caso apenas cinética, da mesma partícula.

Porém, a outra equação $W = -\Delta E_p$ já não se pode usar, pois a partícula, por si só, não armazena qualquer energia potencial. A energia potencial gravítica é armazenada no campo gravítico do mesmo modo que a energia potencial eléctrica é armazenada no campo eléctrico ou a energia potencial elástica no campo de forças elásticas.

Por uma questão de clareza, vamos esclarecer o que é «armazenar energia na forma potencial».

Quando é realizado trabalho sobre um sistema, é transferida energia para o mesmo, e o trabalho mede essa energia transferida. Vamos agora supor que, posteriormente, esse sistema pode realizar um trabalho igual (num processo isotérmico), pelo que a energia transferida para o sistema pode ser recuperada integralmente no exterior. Dizemos, nessas condições, que o sistema armazenou energia na forma potencial.

Possuindo este e outros *subsunçores* (o conceito de partícula, por exemplo), vamos agora analisar o exemplo da esfera que lançamos verticalmente para cima com a mão.

No acto de lançamento, a resultante da força da nossa mão com a força gravítica, ambas actuando na **esfera**, considerada como **partícula**, realiza um trabalho $W > 0$ sobre ela que constitui o nosso **sistema**. A energia cinética da partícula aumenta e, quando a partícula abandona a mão, já possui uma determinada energia cinética.

É este o instante inicial em que vamos passar a acompanhar a evolução energética da partícula que considerámos como sistema.

A partir de então, o sistema está actuado por uma força exterior exercida pelo campo gravítico, que realiza trabalho, e o trabalho dessa força,

$$W(\vec{F}_g) < 0$$

faz com que haja uma transferência de energia da partícula (onde actua a força resistente) para o campo gravítico (que exerce a força resistente), medida por esse trabalho. Assim, a partícula vai perdendo energia (a energia cinética vai diminuindo) e o campo gravítico vai ganhando energia (a energia potencial vai aumentando). Quando a partícula atinge a sua posição mais alta, toda a energia até aí manifestada pela partícula (energia cinética) passa a estar «armazenada» no campo gravítico na forma de energia potencial.

Na transformação oposta, há uma transferência de energia oposta. A energia transfere-se agora do campo gravítico (que exerce a força potente) para a partícula (onde actua a força potente), sendo essa energia transferida medida pelo trabalho

$$W(\vec{F}_g) > 0$$

Também podemos definir à partida um outro **sistema**, mas, para mantermos a coerência, teremos de modificar a interpretação. Vamos, então, considerar como sistema, não a partícula, mas o **conjunto partícula *mais* campo gravítico**.

Agora, como o sistema foi alterado, a interpretação é outra. Neste caso, já não há forças exteriores ao sistema a realizar trabalho (despezando a resistência do ar), e não tem qualquer significado afirmar-se que houve um trabalho realizado sobre o sistema ou pelo sistema.

Nestas condições, há que falar em energia interna do sistema e analisar o problema em termos de forças interiores conservativas ou não conservativas. Como só estamos a considerar a força gravítica que é conservativa, não há dissipação de energia mecânica no interior do sistema, quer dizer, só ocorrem transformações de energia cinética em potencial e de potencial em cinética no interior do sistema.

Em *conclusão*:

Porque não há trabalho realizado por forças exteriores a actuar no sistema, a sua energia total não varia.

Como, por outro lado, as forças interiores são todas conservativas, a energia cinética mais a potencial mantém-se constante. As respectivas variações são simétricas.

Há quem fale em trabalho interno para designar as trocas de energia que ocorrem no interior dos sistemas. Concordamos com Bauman (Idem, Ibidem) que a designação trabalho interno só confunde. Com efeito:

- Não mede qualquer transferência do sistema para o ambiente ou deste para o sistema.
- Não pode ser calculado através de qualquer força exterior aplicada no sistema.

Já ficou sobejamente comprovado que se levantam grandes dificuldades quando não existe uma definição correcta do **sistema** em estudo e do **referencial** em que é feito o estudo. Mas, por outro lado, há que ter também presente o quadro conceptual em que é legítimo analisar o fenómeno em estudo. Quando mudamos de quadro conceptual há que repensar as concepções acerca das grandezas físicas, sob pena de pôr em cheque uma das características mais ricas da Ciência: a sua coerência lógica.

Vamos mostrar isto através de um exemplo.

Foi estabelecida a lei que proclama a conservação da energia. Podemos enunciá-la deste modo:

«A variação de energia de um sistema é simétrica da variação da energia do ambiente com o qual interactua».

Acontecia o mesmo com a massa. Considerava-se que:

«*A variação de massa de um sistema é simétrica da variação de massa do ambiente com o qual interactua*».

Porém, em determinado momento, descobriram-se fenómenos em que a massa de um sistema diminuía ou aumentava, observando-se, ao mesmo tempo, uma transferência de energia do sistema para o exterior ou do exterior para o sistema, respectivamente.

Vamos ver duas maneiras de encarar estas situações experimentais, **duas representações** distintas acerca do que se passa:

1ª representação - Se temos um sistema que perde massa e vemos, ao mesmo tempo, aparecer energia no ambiente, é porque **a massa se converteu em energia**. A massa é a massa, a energia é a energia, mas uma é convertível na outra.

Pensando no sistema global formado pelo conjunto *sistema mais ambiente*, vemos que a massa não se conservou, a energia também não se conservou, e o que se conservou nesse novo sistema global foi uma combinação das duas:

$$m + \frac{E}{c^2} = \text{constante}$$

2ª representação - Se temos um sistema que sofre um decréscimo de massa Δm e um ambiente onde há um acréscimo de energia ΔE , então:

- a massa do sistema diminuiu Δm e a energia contida no sistema diminuiu

$$\Delta E_0 = \Delta m \cdot c^2;$$

- a massa do ambiente aumentou Δm e a energia contida no ambiente aumentou

$$\Delta E_0 = \Delta m \cdot c^2.$$

A massa e a energia variaram concomitantemente, de modo proporcional quer no sistema quer no ambiente, e **no sistema global** (sistema mais ambiente) **ambas se conservaram**.

Esta segunda representação dos fenómenos em que está envolvida a energia de massa resume-se deste modo:

A energia total *contida* num sistema isolado é uma grandeza que se conserva invariável e a massa (a ela equivalente) também. Isto não invalida que ambas possam variar concomitantemente, quando o sistema deixa de estar isolado.

Se adoptarmos, em toda a sua plenitude, o *quadro conceptual da Relatividade Restrita*, é esta segunda representação que se integra de modo perfeito nessa rede de conceitos. A primeira concepção tem, ainda, subjacente, determinados conceitos pertencentes ao quadro da Mecânica newtoniana que carecem de ser modificados (Apêndices 3 e 4).

Passemos agora a discutir os **aspectos predominantemente psicológicos** que estão na base das concepções alternativas dos professores.

Tal como afirmámos a propósito dos alunos, as estruturas da inteligência não são inatas. Vão-se desenvolvendo ao longo da vida.

Na perspectiva psicológica de Piaget, os professores já passaram por todos os estádios de desenvolvimento intelectual, ou seja sucessivamente o estágio da inteligência sensório-motora, o estágio de preparação e de organização da inteligência operatória concreta e o estágio da inteligência operatória formal.

Por terem atingido o estágio de pensamento formal, até parece à primeira vista que os professores enfrentam qualquer situação nova (e a sua actividade docente é tão mais rica quanto mais recheada está de situações novas) raciocinando imediatamente em termos estritamente formais.

Tal não corresponde à realidade. Todos nós, adultos, sejamos professores ou não, notamos bem que isto não é assim.

Os estádios de desenvolvimento, segundo Piaget, têm carácter integrativo, isto é, torna-se necessário reconstruir em cada estágio as estruturas construídas nos anteriores.

Assim, tentamos sempre construir a partir do concreto os nossos conhecimentos novos, para mais facilmente operarmos com eles a nível da abstracção.

Quem, pela primeira vez, estuda a Teoria da Relatividade, procura agarrar-se inicialmente ao «concreto». Tenta então imaginar, por exemplo, os célebres «combóios espaciais» e «foguetões de Einstein». Esse apoio num modelo «concreto» ajuda-o a avançar firmemente para o tratamento mais formal da teoria, feito com considerações baseadas na geometria a quatro dimensões.

É sabido que a história da Física foi, neste aspecto psicológico, algumas vezes traiçoeira, ao colocar-nos perante modelos formais sem uma base concreta firme. Quando tal sucedeu, os cientistas, porque não se podem libertar dos aspectos psicológicos inerentes à sua condição humana, deram bem conta disso!

É o caso da entropia, que surgiu formalmente com o integral de Clausius sem qualquer modelo concreto que a suportasse. Esse conceito só se tornou transparente quando, baseado no modelo cinético (que no fundo é um modelo «concreto» de «bolinhas»), Boltzmann nos levou a compreender melhor o que era a entropia.

Quando afirmamos a necessidade psicológica de o ser humano se apoiar no «concreto» para melhor construir o seu conhecimento, não significa que este parta do concreto. A análise do concreto faz-se com os «*olhos da mente*» e, logo à partida, o objecto concreto e a mente do sujeito ficam envolvidos numa relação tal como discutimos no 3º capítulo.

A história da Física do nosso século, profundamente esotérica, é rica em situações em que o conhecimento se constrói com pouco apoio no concreto. É o que sucede com a Mecânica Quântica. Deve ser por isso que Feynmann, com aquela sua maneira divertida de dizer verdades, afirmou um dia (cito de cor) que *“quem diz que compreende a Mecânica Quântica não sabe Mecânica Quântica”*!

Compreender a Mecânica Quântica, na fase actual, é algo semelhante a compreender qualquer das teorias especulativas que a Matemática nos oferece. Diremos mesmo que o recurso aos modelos concretos figurativos, como os livros didacticamente procuram fazer, serve muitas vezes mais para nos conduzir a ideias incorrectas do que para nos esclarecer, particularmente se não tivermos um bom domínio do formalismo quântico. Esses modelos figurativos constituem, pois, muitas vezes, autênticos obstáculos cognitivos, no sentido bachelardiano.

Tal como afirmámos na secção 4.4, actualmente presta-se mais atenção, em termos de Psicologia da Educação em Ciência, à perspectiva de Vygotsky do que à de Piaget, sem que isso belisque minimamente com o mérito da excelente obra do epistemólogo suíço.

E porque se dá hoje tanta importância à perspectiva de Vygotsky? Porque, tal como já referimos, este psicólogo russo valorizou, muito mais do que Piaget, a influência da aprendizagem no desenvolvimento do ser humano. A sua teoria da área potencial de desenvolvimento *“teve consequências muito importantes, tanto no plano pedagógico como no da investigação psicológica”* (Cecchini, 1991, p. 20).

As bases psicológicas da aprendizagem para o desenvolvimento e os primeiros passos fundamentais no sentido de investigar experimentalmente os mais variados problemas didácticos devem-se a Vygotsky e outros psicólogos da educação soviéticos, de que destacamos Leontiev, Kostiuk, Luria, Bogoyavlensky, Menschinskaya, etc.

Analizadas à luz desta perspectiva do que poderemos chamar a «*escola soviética*», as concepções alternativas dos professores resultaram em grande parte de más experiências de aprendizagem da Ciência que efectuaram, e de deficiências de transmissão cultural a que estiveram sujeitos, tendo portanto origens algo semelhantes às concepções alternativas dos alunos.

As deficiências dos livros por onde os professores aprenderam, as incorrecções dos mestres que os ensinaram, as más experiências de aprendizagem que viveram como alunos, constituíram factores decisivos a respeito do seu desenvolvimento intelectual e conduziram-nos à interiorização de ideias de que dificilmente se libertam.

A nossa experiência de mais de 20 anos de autor de livros de Física é esclarecedora a este respeito. Analisando as estratégias com que tratávamos determinados temas nos anos 70 à luz dos conhecimentos que hoje possuímos, vemos toda a influência marcante da aprendizagem da Física que tivemos, quer como aluno quer nos primeiros anos de docência. E transparece no nosso espírito uma gama de dificuldades de que na altura nem tínhamos plena consciência, por exemplo, a dificuldade em nos libertarmos da associação tradicional da velocidade ao espaço percorrido (em vez da posição), da confusão entre a primeira lei de Newton e a segunda, da confusão entre a segunda lei de Newton e a definição de força, da dificuldade de distinguir claramente entre trabalho dissipado e calor, etc., etc..

Creio que todos os jovens professores de Física passarão por dificuldades idênticas pois o processo de aprendizagem significativa e segura da Física está longe de ficar concluída na Universidade.

Passando agora a analisar as origens das concepções alternativas de cada professor, com base na perspectiva ausubeliana da Psicologia da Educação, diremos que essas origens residirão, em última análise, em deficiências na sua estrutura cognitiva.

Se, por exemplo, o conceito de aquecimento está incorrectamente associado na estrutura cognitiva de um sujeito com o conceito de calor, então esse sujeito possui a concepção incorrecta de que a dissipação do trabalho mecânico é uma forma de calor, pois ele observa que dessa dissipação do trabalho mecânico resulta, de facto, um aquecimento.

Recordamos aqui o seguinte aspecto importante que referimos na secção 4.4: **aprendizagem significativa** de um determinado conteúdo científico **não significa** a **aprendizagem correcta** desse conteúdo.

Um professor aprendeu significativamente que *a inércia de um corpo aumenta com a sua velocidade*, pois os conceitos referentes a esse conteúdo científico foram incorporados de modo substantivo na sua estrutura cognitiva, isto é, ancoraram perfeitamente nos conceitos subsunçores que já lá existiam, mas isso não significa que seja correcta a afirmação de que a inércia aumenta com a velocidade.

Ao alterar-se a estrutura cognitiva de um sujeito, com a ocorrência nessa estrutura de *diferenciações progressivas** e *reconciliações integradoras** dos conceitos, ela irá assimilar a nova informação de modo diferente e as ideias resultantes serão outras.

Quando a estrutura cognitiva de um sujeito (seja ele um aluno ou um professor) tem deficiências e imprecisões no que se refere as subsunçores de determinada informação nova, os significados atribuídos a essa informação serão incorrectos.

O professor ensina o que aprendeu. Sabemos que um conceito fundamental na teoria ausubeliana é a de **aprendizagem significativa**. Para que esta ocorra, o material de aprendizagem tem de ser potencialmente significativo, isto é, o seu conteúdo terá de ser susceptível de ser incorporado de modo substantivo na estrutura cognitiva do sujeito que aprende.

Segundo Ausubel, o novo material só será susceptível de ser incorporado significativamente na estrutura cognitiva de quem aprende se possuir significado lógico e psicológico para ele.

Os maus livros, protocolos experimentais e demais ferramentas com que o professor trabalha serão maus se não tiverem uma estrutura lógica, e um discurso transparente, mas serão ainda mais nocivos se, tendo uma coerência lógica e um discurso acessível, contiverem incorrecções científicas. É que, no 1º caso não haverá sequer incorporação do referido material na estrutura cognitiva, e teremos um mal menor porque esse material estará condenado a ser esquecido. O pior será no caso em que o material com incorrecções é ancorado aos subsunçores por se revelar coerente com um quadro conceptual pré-existente na mente que também já contém incorrecções. Nesse caso as ideias incorrectas «ancorarão» nas ideias incorrectas e teremos, então, como resultado, a interiorização de ideias inaceitáveis, como aquelas de que temos vindo a dar exemplos.

Em suma:

Para além da própria natureza da percepção humana, há factores que, por via psicológica, influenciam as ideias dos professores. Os *curricula* e os materiais didácticos, quando reforçam o efeito bloqueador da nossa perspectiva de senso comum, são factores importantes.

A Psicologia do desenvolvimento cognitivo mostra bem a importância da actividade experimental e dos problemas (em que não estão incluídas as questões rotineiras de treino) na eliminação de concepções alternativas. Ora os *curricula* que temos tido não estimulam nem a actividade experimental nem a resolução de problemas.

Passemos agora, finalmente, a explorar a via **predominantemente sociológica**.

Tal como vimos a propósito dos alunos, as concepções dos professores são profundamente influenciadas pelo meio em que vivem inseridos. Factores como crenças e hábitos, a linguagem, os livros que lêem e o tipo de formação a que foram e são sujeitos influenciam o seu modo de ensinar.

A este respeito, e com base em diversos artigos consultados (Ogborn, 1976, Summers, 1983, Pereira, 1988, Vasconcelos e Loureiro, 1988, etc.) e na nossa própria reflexão, podemos referir como factores desencadeadores das concepções alternativas dos professores e/ou razões da sua persistência as seguintes:

- a sua vivência pessoal dentro e fora da escola, em condições difíceis que não permite um diálogo fomentador do espírito crítico;
- a linguagem que utilizam no dia a dia;
- o material didáctico em que se apoiam, incluindo os livros e protocolos experimentais que utilizam;
- o peso da tradição cultural;
- a sua formação académica, quase sempre centrada em conteúdos tratados de modo demasiado formal e desgarrado da realidade física a que dizem respeito;
- e, como consequência do factor anterior, o hiato entre a Física aprendida e a Física ensinada.

Começando pela **experiência pessoal** de um professor, consideramos muito importante o diálogo acerca dos conceitos físicos e educativos com os outros professores da mesma área e de outras áreas afins, da mesma escola e de outras escolas.

Tanto quanto julgamos saber, verifica-se muito pouca discussão de ideias entre os professores nas nossas escolas. Os professores mais jovens valorizar-se-iam muito mais rapidamente se procurassem tirar um pouco mais de partido dos professores de maior experiência.

Passando ao aspecto da **linguagem do dia a dia**, ela é origem de muita confusão devida, particularmente, ao uso:

- *da mesma palavra para significar coisas completamente diferentes* (é o caso, por exemplo, da palavra *aquecimento* para traduzir subida de temperatura, com ou sem fornecimento de calor, ou fornecimento de calor, com ou sem subida de temperatura);
- *de palavras com significados vulgares que se afastam muito do seu significado científico, muito particular*, portanto usadas em condições inadequadas (é o caso, por exemplo, da designação *velocidade média*, que tem, em Física, um significado muito particular, mas que vulgarmente é usada com outro significado que não esse).

O **material didático**, particularmente os livros que um professor usa, são decisivos para a sua valorização. Com efeito, a investigação levada a cabo por Harmes e Yager, em 1981, mostrou que *mais de 90 % dos professores de ciências usam um livro de texto em 95 % do tempo* (Renner et al., 1990, p. 35). Muitas das ambiguidades na utilização de designações como a de energia potencial, calor, energia térmica, posição, peso, massa, etc, são veiculadas pelos próprios livros usados pelos professores, tal como oportunamente mostrámos.

Poderíamos apresentar muitos outros exemplos para fundamentar esse facto, mas vamos cingir-nos a dois dos mais sugestivos que revelam bem a propagação dos erros aos professores de geração em geração através dos livros (este facto, no nosso país, tornou-se ainda mais decisivo no tempo do «livro único»).

Um desses exemplos diz respeito à lei isobárica de Gay-Lussac. É vulgar os manuais de ensino apresentarem esta lei recorrendo a uma experiência efectuada apenas com o ar, salientando mesmo a necessidade de o ar estar seco (alguns recomendam mesmo o uso de excicadores para secar o ar).

Ora, esta abordagem induz a ideia de que esta lei experimental só se verifica com o ar e não com os outros gases, e que deixa de se verificar quando o ar está húmido, o que não corresponde à realidade.

Spurgin (1989, pp. 47 a 59) investigou a história da lei de Gay-Lussac e do seu ensino e acabou por efectuar as seguintes críticas à concepção tradicionalmente transmitida:

1ª - As estratégias de ensino são copiadas de autor para autor, secundarizando-se em todas elas o mais importante aspecto da lei: a sua aplicação geral a todos os gases.

2ª - A restrição aos gases secos não tem razão de ser já que a lei também se verifica quando os gases contêm vapor de água (não podem é conter água líquida).

3ª - A designação da lei é inadequada já que o contributo de Charles para o estabelecimento da lei não existiu.

4ª - A lei é muitas vezes traduzida pela equação

$$V = V_0 (1 + \alpha t)$$

o que é incorrecto, já que esta equação não traduz qualquer indução experimental, é antes o fruto de uma dedução que se obtém da definição de temperatura com base na expansão dos gases.

5ª - O uso de termómetros de mercúrio não tem sentido já que corresponde a usar um termómetro para controlar o funcionamento do termómetro de gás com o qual ele foi calibrado.

Porém, o aspecto mais importante e que nos interessa aqui realçar é este:

Spurgin descobriu que estas deficiências na estratégia de ensino da lei de Gay-Lussac são devidas a um manual francês de Física, publicado em 1816, *cujas abordagens incorrectas foram seguidas por muitos outros autores até à actualidade*.

Um outro exemplo, este no nosso país:

Num manual português de 1915 (manual XV) o princípio da inércia, a força instantânea e o movimento rectilíneo uniforme aparecem associados (1915, p. 47). A força instantânea aparece implicitamente como causa do movimento rectilíneo uniforme.

Num outro manual, este já de 1935 (manual XVI) vem escrito o seguinte (1935, p. 279):

“Nos preliminares, vimos que, em virtude do - *princípio da inércia, uma força instantânea produz um movimento rectilíneo e uniforme*.”.

Num manual de 1957 (manual XIV), num capítulo intitulado «*Relações entre as forças e os movimentos*», uma das secções tem como título «*Força instantânea e movimento uniforme*» (1957, p. 25) e todo o discurso é baseado na concepção alternativa de que o movimento (concretamente o uniforme) necessita de uma força (uma força instantânea) como causa.

E assim se propagou de livro em livro, de autor em autor, esta representação alternativa de que uma força instantânea produz um movimento rectilíneo e uniforme.

Na realidade, uma força instantânea ou impulsiva, na breve fracção de segundo em que actua, cresce a partir de zero até um valor máximo e depois decresce. O corpo onde actua a força é, portanto, sujeito a uma aceleração variável durante a sua actuação. Logo, não pode ter movimento uniforme.

Por este exemplo vemos como a transmissão cultural através dos livros, de geração em geração, das concepções alternativas é uma das razões por que os professores as possuem.

Este **peso da tradição cultural** é enorme e faz-se sentir no ensino. Por exemplo, a tradicional separação da Mecânica da Termodinâmica, quando levada ao ponto de eliminar da primeira dessas áreas da Física quaisquer considerações pertencentes à segunda, conduz a concepções incorrectas sobre a relação trabalho-energia, como vimos em 4.6.4.2.

É também por tradição cultural que se explica a manutenção, por exemplo:

- da *ideia causal de energia* (secção 4.6.4.1), conforme se pode concluir da história do desenvolvimento do conceito de energia (Ogborn, 1986, p. 30);
- da *definição mecanicista de energia*, que desde Rankine se propagou até à actualidade e que esteve na origem de uma histórica confusão entre a energia e energia mecânica (Valadares, 1994, pp. 31 a 35);
- da *substantificação da energia*, patente nesta frase transcrita de um livro português actual (Manual XX, p. 59): “*Os alimentos com que nos sustentamos, bem como os combustíveis fósseis (petróleo, carvão, gás natural) não são mais do que reservas acumuladas de energia solar*”;

- da *energia térmica*, como forma de energia, “*o mais obscuro, o mais misterioso e o mais ambíguo termo empregue pelos autores de livros de Física elementar e por químicos*” (Zemansky, 1970, p. 299).

Bauman, num artigo sobre concepções incorrectas nos livros de Física, afirma que o conceito de energia térmica é difícil (1992, p. 354), mas, no entanto, continua a usá-lo. Não vemos outra razão para isso, a não ser devido á inércia conceptual a que ele e nós todos estamos sujeitos, provocada pela tradição cultural.

A calorimetria é uma ramo histórico da Física que surgiu ainda quando os conhecimentos dos fenómenos térmicos eram muito embrionários. Muitas das designações a que a cultura científica daquele tempo recorria para descrever os fenómenos calorimétricos continham subjacente a ideia de que é um fluido, o calórico, que transita dos corpos quentes para os frios. Daí proveio uma herança cultural recheada de expressões potencialmente confusas, que faz com que muitos professores, ao ensinarem a calorimetria, transmitam aos alunos concepções alternativas acerca do calor e da energia.

Vamos apresentar um último exemplo ilustrativo da influência cultural na manutenção das concepções alternativas, quer de professores quer de alunos.

Em Junho de 1987 o conhecido jornal nova-iorquino *Newsday* passou a publicar uma secção dedicada à *descoberta*, pelos seus leitores, particularmente os jovens, dos segredos da Ciência. A principal responsável por essa secção, Kathy Wollard, passou então a discutir e a tentar explicar aos leitores do *Newsday* as mais variadas questões científicas, desde as que têm que ver com observações tão vulgares que passam despercebidas, por exemplo, «*porque é que o céu é azul?*», até outras menos familiares, por exemplo, «*O que acontece a um objecto que se aproxima da velocidade da luz?*».

Os jovens leitores entusiasmaram-se de tal modo que passaram eles próprios a colocar diversas questões para o jornal, e o êxito foi tal que muitos outros jornais e

revistas da América e de outros países adquiriram direitos para publicar esses artigos.

Entretanto Kathy Wollard, conjuntamente com a sua ilustradora Debra Solomon publicou um livro intitulado «*How Come?*» que também conheceu um êxito tão grande que está traduzido em vários países, incluindo Portugal.

Quantos milhares de alunos e professores em todo o mundo não leram e não virão ainda a ler este excelente livro?

Pois bem, a par com explicações correctíssimas e extremamente didácticas de diversos fenómenos físicos, lá aparecem algumas das ideias que neste trabalho rotulámos como concepções alternativas e que irão certamente reforçar essas concepções nos alunos e nos professores que lerem o livro.

Assim, na página 70 dessa obra podemos ler o seguinte:

“A 90% da velocidade da luz, a mesma nave (e tudo o que nela existe) aumentaria monstruosamente em massa, tornando-se mais do que três vezes mais pesada.

(...)

(Cientistas sabem que estes efeitos são reais, porque eles observam a massa das partículas a aumentar quando as forçam a aumentar cada vez mais a sua velocidade nos aceleradores)”

Ora, o que os cientistas observam é que o tempo que as partículas levam a aumentar a sua velocidade é cada vez maior, não porque a massa aumentou mas porque o tempo está a ser medido relativamente a um referencial em que a partícula se está a mover cada vez mais depressa. A «quantidade de matéria» (quadro newtoniano) aumentou? O «conteúdo de energia» da partícula (quadro einsteiniano) aumentou?

Passemos agora a discutir o aspecto da formação.

A **formação académica** dos professores e a forma deficiente como depois é feita a sua **formação contínua** também contribui em larga medida para as dificuldades conceptuais que eles revelam.

A formação académica dos futuros professores tem de ser rigorosa e actual, do ponto de vista científico, mas devia ser acompanhada de uma componente didáctica sólida, o que não sucede.

A cultura científica do professor devia ser adquirida num contexto didáctico de acção, isto é, os professores deviam ser preparados para abordar em termos didácticos (que muitas vezes têm de ser operacionais e concretos) os temas científicos assimilados em termos necessariamente muito mais formais. Essa ponte entre a reflexão formal e a acção concreta é difícil e o professor tem de ser preparado para a fazer (de facto, a maior dificuldade não está em decorar e usar fórmulas, mas sim em compreender o significado cientificamente correcto dos conceitos e o modo como eles se relacionam entre si e com a vida prática).

A formação permanente deveria ter uma *componente científico-didáctica* com ênfase no que acabámos de dizer, e uma *componente pedagógico-didáctica* onde temas de pedagogia e didáctica geral seriam abordados também numa perspectiva de acção.

Parece à primeira vista que, com uma sólida formação pedagógica, com bons conhecimentos de *História e Epistemologia da Ciência*, *Psicologia* e *Sociologia da Educação* e *Avaliação Educativa*, os professores deixarão de ter concepções alternativas. Pura ilusão, quanto a nós.

Por um lado, há factores psicológicos profundamente envolvidos na origem das ideias de cada ser humano e que influenciam o modo como ele apreende a estrutura de um assunto.

Por outro lado, os materiais que estão na base da formação dos professores apresentam, eles próprios, enormes contradições e representações alternativas. Vejamos alguns exemplos disto, cingindo-nos, por uma questão de espaço, apenas ao conceito de calor.

Num artigo publicado numa das melhores revistas de educação em Ciência, a «*School Science Review*», um físico da Universidade de Hong Kong escreve a dada altura (Summers, 1983, p. 670):

“As seguintes afirmações são fundamentalmente insatisfatórias (e, em alguns casos simplesmente incorrectas):

(...)

Calor é a designação atribuída à energia no processo de transferência de um local para outro como resultado de uma diferença de temperatura”

Num outro artigo publicado quatro anos mais tarde precisamente na **mesma revista**, dois físicos exactamente da **mesma universidade**, escreveram o seguinte (Mak e Young, 1987, p. 468):

“Fluxo calorífico é o processo pelo qual a energia se transfere como resultado de uma diferença de temperatura. Calor é a energia transferida nesse processo”.

Summers, ao explicar porque é incorrecto falar-se em calor no processo de transferência de energia entre corpos a temperaturas diferentes, afirma (1983, pp. 671 e 672):

“É importante compreender que não há nada que se possa chamar calor transferido neste processo.

(...)

A um nível microscópico apenas temos interacções moleculares através das quais a transferência de energia ocorre. Em todas as fases durante a transferência de energia está a energia interna dos corpos envolvida.

(...)

Em todas as fases do processo apenas temos transferências de energia interna a ocorrerem como resultado de uma diferença de temperatura”

Mak e Young são, uma vez mais, de opinião oposta (1987, p. 467):

“Do mesmo modo que se rejeitam expressões que impliquem que o calor possa ser armazenado, também se devem rejeitar expressões que impliquem que a energia interna pode ser transferida”.

Um das mais importantes obras para o ensino da Física no nosso século, o «*Physical Science Study Committee*» resolveu *abolir a palavra calor* e utilizar a designação de *fluxo calorífico*.

Diversos artigos sobre o ensino da Física, de então, para cá, defenderam a *abolição do substantivo «calor»* (Heath, 1979, Akrill et. al., 1982, Summers, 1983, etc.)

Porém, físicos consagrados como Zemansky (1970, pp. 294 a 300) e Alonso e Finn (1995, pp. 296 a 310), em dois artigos sobre o ensino dos fenómenos termodinâmicos, propõem o *uso*, sem qualquer problema, *da palavra «calor»*.

Zemansky (1970, pp. 298 e 299) defendeu a *abolição do verbo «aquecer»* e do substantivo «*aquecimento*», pois considera estas designações geradoras de concepções incorrectas. Mas Summers, pelo contrário, *defende a palavra aquecimento* e entende que *é de abolir a palavra calor* (1983, pp. 671 e 675).

Para Summers, o *calor*, tal como o trabalho, *não é uma forma de energia*. É um processo de variar a energia interna (1983, p. 675). Para Zemansky (1970, pp. 294 a 300), para Warren (1972, p. 43), bem como para todos os outros físicos acabados de referir, o *calor é uma forma de energia*.

Warren reconhece que o estatuto da radiação, como forma de propagação de calor “*está sujeito a alguma controvérsia*” (1972, p. 41), mas mantém a tradição histórica, assim como a grande maioria dos autores dos livros de Física que consultámos: os processos de propagação do calor são três, a condução, a convecção e a radiação.

Porém, Alonso e Finn consideram a radiação como um mecanismo distinto do da transferência de calor, traduzindo matematicamente a primeira lei da Termodinâmica na seguinte forma:

$$\Delta U = W + Q + R \text{ (1995, p. 299).}$$

E afirmam o seguinte: *“Alguns poderão argumentar que a parcela radiação deveria ser incorporada na parcela calor, Q. Ainda que seja verdade que, em última instância, todas as partículas interactivam através da absorção ou emissão de fótons reais ou virtuais, para Q e W as trocas de fótons não têm de ser consideradas explicitamente, apenas para R.”* (Ibidem, p. 299).

Como fica sobejamente ilustrado, há concepções díspares entre os mais consagrados e influentes físicos... Elas não poderão deixar de se repercutir nos professores de Física do ensino básico e secundário e no seu ensino.

4.9 Conclusões a respeito das concepções alternativas dos professores

A análise da pesquisa por nós e por outros efectuada acerca das concepções alternativas dos professores leva-nos a aceitar como válidas as seguintes conclusões:

1ª - Os professores, do mesmo modo que os alunos, possuem *concepções alternativas* acerca dos fenómenos físicos (Mc Dermott, 1984). Com efeito, também neles surgem ideias pessoais que revelam uma característica fundamental das concepções alternativas que é o seu carácter sistemático, portanto *não ad hoc*, que as torna universais em termos de disseminação e independência do país de origem, do ambiente cultural, da experiência de ensino e do sexo.

2ª - Há características comuns às concepções alternativas dos professores e dos alunos, como sejam a analogia com concepções históricas, grande resistência à mudança conceptual (são transmitidas culturalmente ao longo dos anos), o facto de se esconderem muitas vezes por trás da linguagem técnica e, finalmente, a falta de consistência interna e externa que possuem.

3ª - Há, porém, algumas diferenças entre as concepções alternativas dos professores e dos alunos. As dos professores aparecem, geralmente, de um modo mais reflexivo e são manuseadas de um modo mais consciente (Lobo, 1994, pp. 41 a 43). Além disso, manifestam-se, geralmente, de modo mais subtil e/ou em situações mais complexas e possuem maior abrangência nos fenómenos em que são utilizadas.

4ª - Alguns dos factores mais importantes que estão na origem das concepções alternativas de um professor e que, no fundo, têm que ver com a natureza do conhecimento científico são os seguintes:

- *factores de indole predominantemente epistemológica*, como sejam o conhecimento intuitivo, sensorial, que antecede o pensamento científico, as suas crenças e convicções metafísicas, a não existência de um quadro conceptual claramente estabelecido, de um referencial e/ou de um sistema consistente e coerentemente adoptado;
- *factores eminentemente psicológicos*, que têm que ver com deficiências da própria natureza da percepção humana e outras provenientes da falta de coerência e significado lógico e psicológico dos materiais que utilizou e utiliza na sua formação e no seu ensino, incluindo os *curricula* e os livros, e que acabam por se traduzir em deficiências nas concepções existentes na estrutura cognitiva e no modo como nela estão estruturadas;
- *factores de natureza preponderantemente sociológica*, aqueles que têm que ver com o contorno social em que o professor vive e trabalha bem como com o peso da tradição cultural que é importante, desde a

linguagem do dia a dia às condições de trabalho na escola, à maior ou menor formação que esta lhe proporciona, ao tipo de formação, etc.

5ª - Também os professores, a exemplo do que sucede com os alunos e, em geral, com quaisquer seres humanos, tentam sempre compreender os novos acontecimentos através das relações com os conhecimentos que já possuem. Os referenciais interpretativos foram construídos individualmente por cada um. As novas ideias vão depender desses referenciais, no fundo da sua estrutura cognitiva. Se os conceitos se encontram deficientemente assimilados, existem interconexões entre esses conceitos que não são consistentes do ponto de vista científico e estabelecem-se ligações incorrectas com os novos conceitos. Em consequência, os significados que vão ser retirados da nova informação vão ser inaceitáveis. Justifica-se, assim, o facto de os professores, tal como os alunos, poderem apreender significativamente concepções incorrectas, poderem inteligentemente extrair significados incorrectos acerca da sua experiência do mundo exterior.

6ª - Os significados de um professor acerca de um conteúdo, que se traduz pelo conjunto de procedimentos, linguagem, associações e analogias entre ideias do professor acerca desse conteúdo, é decisivo para o modo como ele o ensina.

4.10. Concepções alternativas em Física

O movimento das concepções alternativas surgiu na área das Ciências da Educação há cerca de duas décadas. Tem por base uma visão construtivista da aprendizagem segundo a qual o conhecimento de cada ser humano é uma construção pessoal e idiossincrásica baseada nas preconcepções que esse ser humano possui. Estas concepções à partida influenciam fortemente o modo como decorre a assimilação dos conceitos científicos.

Dada a natureza do conhecimento do mundo físico, que procurámos caracterizar no capítulo anterior, não é de espantar que ao longo do desenvolvimento histórico desse conhecimento tenham surgido as mais diversas representações sobre os mesmos objectos/acontecimentos. Iremos, na secção 4.11, reforçar mais uma vez a ideia de que algumas dessas representações têm características semelhantes às concepções alternativas dos alunos e dos professores de Física que atrás estudámos. Por este motivo, designamos essas representações da história da Física por *concepções alternativas em Física*.

A existência de concepções alternativas, não só no ensino da Ciência, mas também na própria Ciência, não se nos afigura estranha. Afinal, não é a própria construção da Ciência uma aprendizagem do Homem acerca do mundo? As ideias que os cientistas tiveram não foram também construídas com base na confrontação com a experiência de um quadro conceptual pré-existente e «interiorizado» por uma consciência científica? E não é verdade que, tal como afirmámos na secção 4.4, o mundo sempre iludiu os sentidos de quem o pretendeu compreender, fosse ele um cientista ou um aprendiz de Ciência?

Quando um cientista como Kary B. Mullis, laureado com o prémio Nobel da Química em 1993, defende recentemente que *a SIDA não é uma doença infecciosa*, trata-se de uma concepção alternativa quando analisada à luz do conhecimento actual sobre a SIDA. E o mesmo sucede quando o conhecido astrofísico britânico Frederick Hoyle, ou o astrónomo Harlton Arp, que trabalha no Instituto Max Planck na Alemanha, afirmam que *o Big-Bang nunca existiu* e contrapõem concepções que se opõem frontalmente ao modelo padrão da cosmologia (14).

Não temos dúvidas que as ideias de Mullis, Hoyle e Arp têm, para estes cientistas, todo o fundamento, do mesmo modo que as ideias acerca da força de Helsdon (secção 4.6.1) também tinham todo o fundamento para este. Iremos debruçar-nos, na secção 4.12, sobre as origens das concepções alternativas na Física, e teremos

então oportunidade de fundamentar a ideia de que algumas delas são comuns às concepções alternativas no ensino da Física.

Apoiando-se numa dialéctica permanente entre a experiência e a razão, a Física foi evoluindo e conquistando cada vez mais adeptos. Foram surgindo grande número de representações amplamente consensuais que constituem o cerne da Física e se assumem como a consciência dinâmica social a que podemos chamar científica, e que tem vindo a evoluir ao longo dos séculos e continuará sempre a evoluir enquanto o ser humano continuar a utilizar os «olhos da mente» e respeitar mais a experiência do que os dogmas.

Acontece que cada cientista absorve as ideias que a Ciência vai proporcionando de acordo com as suas características pessoais. Para além disso, ainda que respeitando o conhecimento socialmente aceite, recusa-se a hipotecar a sua liberdade intelectual e criatividade. Isto faz com que o conhecimento de cada cientista seja idiossincrásico, e as ideias de cada membro da comunidade científica acerca de um fenómeno possam não ser exactamente iguais às de outro membro acerca do mesmo fenómeno.

Se um cientista for possuidor de um bom espírito científico, saberá abdicar das suas suposições, perante o veredicto dos factos experimentais (seguindo o exemplo de Kepler e de tantos outros cientistas). Porém, não nos devemos esquecer que até a nível factual se colocam problemas epistemológicos, mais numas ciências do que noutras, uma vez que não é unívoca e indiscutível a transformação dos dados e observações em factos, porque essa transformação está «contaminada» pelas preconcepções.

É inerente à natureza da Ciência que a sua história seja construída em torno dos debates de ideias entre cientistas e entre escolas científicas acerca dos mais variados fenómenos, como por exemplo:

- a confrontação entre os heliocentristas e os geocentristas em que Galileu e os peripatéticos se envolveram;

- a oposição entre os adeptos da teoria corpuscular e da teoria ondulatória acerca da natureza da luz;
- a oposição entre os adeptos do calor-substância e os do calor-movimento;
- a polémica entre Luigi Galvani (1737-1798) e Alessandro Volta (1745-1827) sobre a célebre experiência das pernas de rã em contacto com metais diferentes (de que viria a resultar a criação da primeira pilha eléctrica por Volta);
- a confrontação entre os energetistas e os mecanicistas para explicarem os mais diversos fenómenos;
- o debate entre a escola de Bohr e a escola de Einstein acerca da natureza dos fenómenos quânticos;
- a contestação dos adeptos da teoria do estado estacionário ao modelo do Big-Bang.

O que nos ensina a história acerca do resultado destas polémicas? Que uma das concepções em confronto era absolutamente verdadeira e completa, se perpetuou e a outra morreu? Que uma delas contribuiu para o progresso da Ciência e a outra não?

Repetimos aqui o que afirmámos na secção 4.1: as concepções científicas, mesmo quando paradigmaticamente aceites por uma comunidade científica, não devem ser rotuladas de verdadeiras, mas sim de funcionais. E muito menos devem ser consideradas completas.

Isso mesmo ressalta da análise crítica dos exemplos atrás apresentados que vamos a seguir efectuar e de todas as outras polémicas históricas que quiséssemos considerar.

Comecemos pela **confrontação entre os heliocentristas e os geocentristas**.

Apesar de o astrónomo grego Aristarco de Samos ter proclamado que a Terra gira em torno do Sol, em toda a Idade Média prevaleceu a concepção cosmológica geocêntrica e antropocêntrica de Aristóteles. De acordo com esta representação, o Universo é um todo finito, ordenado e hierarquizado, que se mantém idêntico a si mesmo ao longo do tempo. Para além da região sublunar da mudança e da corrupção há a região celestial onde existem as esferas celestes dos astros imponderáveis, incorruptíveis e luminosos, limitada pela esfera última das estrelas fixas.

Nos finais da Idade Média, o geocentrismo aristotélico começou a ser posto em causa. Assim, Nicolau de Cusa (1401-1464) admitia que o Universo é infinito e sem qualquer centro físico. Segundo ele, a haver algo no Universo que tivesse o privilégio de ser considerado o seu centro, esse algo só poderia ser um centro metafísico, o próprio Deus. Note-se que, ao retirar à Terra e aos seres humanos o privilégio de se considerarem o centro do mundo, Nicolau de Cusa não pretendia subestimar o valor ontológico nem retirar nobreza à nossa «casa» e a nós próprios. Pretendia, sim, engrandecer Deus face ao Homem.

O sinecentrismo de Nicolau de Cusa foi também defendido de forma apaixonada por Giordano Bruno (1548-1600), para o qual o movimento e a mudança permanentes eram apanágio do Universo e sinais de perfeição e vida.

Se o mundo fosse finito, se ele tivesse a fronteira das estrelas fixas, se houvesse apenas um sistema solar com um planeta e um ser privilegiado, esse mundo seria imperfeito e uma obra indigna do seu Criador. Deus infinito, sublime criador, só poderia ter produzido uma obra à sua medida, um universo infinito, sem fronteiras, de tal modo perfeito que nem admite sequer o problema da hipotética perfeição ou imperfeição do que pudesse estar para além da sua fronteira no caso de ser finito.

Não é de espantar que estas crenças metafísicas, bastante místicas, estivessem muito para além das cogitações do «comum dos mortais». Não admira que o sinecentrismo fosse, do ponto de vista psicológico, terrivelmente difícil de aceitar pelos seres humanos, dada a carga psicológica da sua vivência numa Terra aparentemente imóvel e no centro da abóboda celeste.

Para além disso, o sinecentrismo opunha-se frontalmente ao antropocentrismo cristão, baseado numa acção teleológica de Deus **na Terra**.

Ora, como provas cruciais da infinidade do mundo não existiam, não é de admirar (mas é de condenar...) que os defensores do sinecentrismo tenham sido perseguidos pela Inquisição. Giordano Bruno, como é sabido, foi condenado e teve um fim trágico.

Profundamente marcado pelas suas convicções filosóficas e pela sua fé religiosa, Kepler (1571-1630) não aceitou a concepção de um mundo infinito, preferindo manter-se agarrado à ideia de um mundo finito. E porquê?

Por um lado, o Universo, a ser infinito, deveria ser estruturalmente uniforme e ter um conteúdo uniformemente distribuído, o que as observações astronómicas de então estavam longe de deixar antever.

Por outro lado, Kepler entendia que um mundo infinito jamais poderia ser investigado na sua plenitude através da Astronomia. Ora, essa limitação do poder da Astronomia, a ciência que ele mais amava, foi algo que ele profundamente rejeitou. Aqui temos mais um exemplo de como a paixão de um cientista por uma causa influencia as suas ideias.

Galileu Galilei (1564-1642), adepto convicto do heliocentrismo, entrou em confronto com os geocentristas, mas teve a plena consciência de quão incompleto era o conhecimento de então acerca do mundo, e, particularmente, da incapacidade da Ciência, nessa época, se pronunciar a favor ou contra a infinidade do Universo. Manifestou mesmo a opinião que esse problema seria eternamente insolúvel, ainda

que, pessoalmente, lhe agradasse mais a ideia de um mundo infinito porque, desse modo, a incompreensibilidade da Ciência acerca do mundo teria mais fundamento (Costa, 1992, p. 33).

O facto de a tão famosa polémica entre o heliocentrista Galileu e os seus colegas geocentristas se ter traduzido pelo triunfo de Galileu, não significa que a representação galilaica fosse acabada e indiscutível. Em Ciência nada é acabado!

Para o contemporâneo de Galileu e fundador da Filosofia Moderna que foi Descartes (1596-1656), o Universo era encarado, tal como vimos noutra local, como um todo mecanicista, cheio e uniforme. O espaço identifica-se com a matéria em movimento turbilhonar e não tem fronteiras. A capacidade de entender é finita. Como consequência deste facto, o Universo é indefinido, e não tem significado o problema da sua infinidade.

Quer dizer: Descartes distingue entre infinito e indefinido. Infinito é Deus. O mundo é indefinido.

O «grande arquitecto» da Física Clássica, Isaac Newton (1642-1727), considerava um espaço absoluto infinito para além dos corpos e englobando-os. Nesse espaço seria possível o movimento eterno preconizado pela lei da inércia. Um dos argumentos com que Newton defendia a infinidade do espaço baseia-se na hipótese, por ele introduzida, da gravidade universal.

Com efeito, se o espaço fosse finito, a matéria nos confins desse espaço seria colapsada gravitacionalmente para o centro em virtude da atracção de toda a massa interior. Sendo o Universo infinito, já não haveria, segundo Newton, uma tal possibilidade, e os colapsos gravitacionais ocorreriam um pouco por toda a parte constituindo o Universo de ilhas que conhecemos.

A representação newtoniana do Universo impôs-se de tal modo nos séculos XVIII e XIX que pensadores como Malebranche (1638-1715), Laplace (1749-1827) e muitos outros a adoptaram sem qualquer hesitação.

Para Laplace, o Universo era um enorme mecanismo funcionando de modo perfeito segundo as leis de Newton. Nele nada é deixado ao acaso. Tudo é previsível. *O futuro é univocamente determinado pelo passado*, com base nas leis da Física.

O *determinismo* associado a esta representação do Universo saiu reforçada com os grandes avanços científicos do século passado, particularmente no domínio da Termodinâmica e do Electromagnetismo.

Foi já no nosso século que se deu uma outra grande revolução epistemológica na representação do Universo. O desenvolvimento da Mecânica Quântica levou a que o paradigma newtoniano de um mundo infinito mas causalmente fechado (no sentido em que tudo o que nele sucede tem uma causa fisicamente determinável) desse lugar a um novo paradigma, o de um **mundo aberto** (no sentido popperiano) em que o causalismo é substituído pelo livre arbítrio a nível das partículas elementares e onde, em consequência disso, cada ser humano actua não segundo leis físicas pré-determinadas, mas segundo a sua liberdade, racionalidade e criatividade.

Mas a representação dominante na primeira parte do nosso século acerca do Universo é a que Einstein, como a quase totalidade dos cientistas do seu tempo, possuía: a de um mundo em estado estacionário, onde as leis da Física imperam e onde o espaço-tempo não está em evolução (nem em expansão nem em contracção).

Porém, a resolução, para o Universo, da sua própria equação da Relatividade Geral conduzia a uma solução correspondente a um mundo dinâmico, em evolução permanente, conforme mostrou o físico soviético Alexander Friedman ao resolver as equações da Relatividade Geral de Einstein referidas ao Universo.

Einstein, pressionado pelas suas próprias convicções, resolveu introduzir uma constante cosmológica *ad hoc* de modo a que as soluções correspondessem ao mundo em que acreditava.

Confrontado mais tarde com factos que apontavam no sentido de o Universo ser, realmente, dinâmico, de se tratar, de facto, de um mundo em expansão, diria que essa alteração *ad hoc* da equação foi o maior erro da sua vida!

A expansão actual do Universo viria a ser comprovada, em 1929, pelo astrónomo americano Edwin Hubble (1889-1953), que mostrou, também, que a velocidade de recessão das galáxias em relação a um ponto qualquer é directamente proporcional à sua distância a esse ponto:

$$v = H d \quad (H = \text{constante de Hubble}).$$

Actualmente muitas dúvidas subsistem acerca do Universo, particularmente a grande incógnita se a sua expansão não terá fim ou se, pelo contrário, haverá um momento em que ele entrará em fase de compressão até atingir uma nova singularidade. A hipótese de vivermos num mundo eterno e pulsante é sedutora.

Mas ainda hoje há quem ponha em causa o modelo do Big-Bang, pois é certo que tal modelo não deixa de apresentar algumas deficiências. (14)

Como vemos, através deste pequeno relato histórico, o que hoje se sabe acerca do Universo é o produto da confrontação dialéctica de ideias. Começou por resultar da confrontação de ideias heliocêntricas e geocêntricas. Está-se hoje na fase de confrontação de modelos bem mais evoluídos e formais. E o que hoje sabemos está longe de constituir conhecimento acabado.

Acerca da polémica sobre a **natureza da luz**, a história também é sobejamente conhecida. Mais de um século depois de a teoria ondulatória da luz ter sido estabelecida por Huygens (1629-1695), essa teoria foi utilizada com sucesso por Thomas Young (1773-1829) para interpretar as interferências, e por Augustin Fresnel (1788-1827), que lhe deu base vectorial, conseguindo um poder explicativo enorme sobre diversos fenómenos ópticos, incluindo os fenómenos de polarização.

Parecia que a teoria ondulatória de Huygens-Fresnel estava certa e completa. Mas bastou, como sempre, o surgimento de um fenómeno que a teoria não explicava para mostrar que tal não é verdade. As dificuldades começaram em Setembro de 1845 com uma observação experimental de Michael Faraday (1791-1867): a de que um feixe de luz polarizada era desviado ao passar entre os pólos de um electroímã.

A partir daqui, e graças principalmente aos trabalhos de Faraday e Maxwell (1831-1879), nasceu uma nova concepção para a luz, baseada na Teoria do Campo Electromagnético. Afinal, a teoria ondulatória estava longe de estar acabada com Huygens, e mesmo mais tarde, com Young e Fresnel.

A par com a evolução da teoria ondulatória, desenvolveu-se a sua antítese: a teoria corpuscular. Será que, após o triunfo da teoria ondulatória no século passado, a ideia de que a luz é constituída por corpúsculos a propagar-se pode considerar-se um acidente do qual nada resultou de positivo para a Ciência?

A história informa-nos que não. Com a teoria corpuscular construiu-se boa Óptica geométrica. Além disso, sabemos que a comunicação de Einstein sobre o efeito fotoeléctrico, em 1905, e todo o desenvolvimento quântico consequente, acabou por mostrar à evidência que, afinal, a luz também tem uma estrutura descontínua, também se comporta como uma «procissão» de corpúsculos de energia e momento, os fótons, capazes de intervirem de modo semelhante aos corpúsculos atómicos, e de modo algum é apenas constituída por ondas a propagar-se, funções contínuas e periódicas do espaço e do tempo.

Como vemos, também a respeito da luz, a história está longe de estar acabada e o que hoje se sabe é uma superação dialéctica entre teorias antitéticas.

No que refere ao **calor**, também é sobejamente conhecido que se confrontaram ao longo da história duas concepções: a de *calor-movimento*, pela primeira vez defendida por Francis Bacon, no *Novum Organum*, publicado em 1620 e mais tarde por Roger Bacon, Boyle e Descartes (Selleri, s/d, p. 51); e a sua antítese, a ideia de *calor-substância*, que seria perfilhada por muitos cientistas de nomeada,

entre os quais destacamos Galileu, Gravesande, Musschenbroek, Crawford, Black, Lavoisier, Laplace e Carnot. Esta ideia do calor-substância conheceria o seu apogeu no século XVIII, quando o paradigma mecanicista estava no auge, e as explicações científicas se baseavam em 6 fluidos imponderáveis - dois fluidos eléctricos, dois fluidos magnéticos, um fluido luminoso e o calórico.

Quando Benjamin Thompson, Conde de Rumford, em consequência da actividade de perfuração dos canhões em Munique, que ele dirigia e sobre o qual investigou, publicou em 1798 as «*Philosophical Transactions*», iniciava-se o triunfo da concepção calor-movimento sobre a concepção calor-substância.

Essa ideia consolidou-se com os trabalhos de Julius von Mayer, James Prescott Joule, Rudolf Clausius e William Thomson, mais conhecido por Lord Kelvin. Mas, ao longo desse percurso, “*as ideias sobre o calor iam-se desenvolvendo com hesitações, imprecisões e contradições, algumas das quais prevaleceram até hoje*” (Valadares, 1994, p. 35).

Quer dizer: a concepção que triunfou estava, uma vez mais, longe de ser uma concepção acabada e inalterável. Pelo contrário, assumiu várias perspectivas, hoje inaceitáveis, e muitas dessas perspectivas são idênticas às que os nossos alunos têm antes de penetrarem, em profundidade, no quadro conceptual da Termodinâmica (Ibidem, p. 36).

Quanto à **discussão histórica entre Galvani e Volta**, também nenhuma das ideias em confronto estava certa.

A ideia de Galvani era incorrecta, pois a origem da contracção das pernas da rã não residia nestas, mais propriamente na electricidade animal, como ele supunha. Porém, a ideia de Volta também não era correcta, já que a contracção das pernas de rã não era devida ao mero contacto de dois metais diferentes; as pernas de rã não funcionavam como meros electroscópios capazes de acusar a electricidade gerada pelo contacto dos metais, como supunha Volta.

A ideia que vingou foi uma superação das ideias desses dois cientistas: sabe-se hoje que a base de explicação do fenómeno reside na perna da rã e nos dois metais diferentes, funcionando as pernas da rã como electrólito e os metais diferentes como eléctrodos.

E que concluir acerca da **confrontação entre os energetistas e os mecanicistas**? Acabou ela com o triunfo absoluto e perene para alguma das partes?

A história mostra que não, já que quer a energia quer a massa e quantidade de movimento se têm revelado fundamentais para uma melhor compreensão dos fenómenos, incluindo os biológicos. Talvez ainda se possam vislumbrar reminiscências dessa polémica em recentes ideias acerca da massa, ideias essas a que nos referiremos em breve (secção 4.10.1).

É sabido como a confrontação entre Einstein e Bohr redundou no confronto de duas escolas opostas acerca da **natureza do mundo quântico**. Uma, a escola de Einstein defende um causalismo subjacente ao mundo quântico e considera que as partículas, quando não perturbadas, se comportam de modo causal. A outra nega a existência desse causalismo subjacente considerando as leis estatísticas da Física Quântica como sendo a última realidade e o indeterminismo como um facto fundamental do mundo quântico. Já referimos noutro lugar que esse saudável confronto de ideias ainda prossegue.

Uma coisa é certa: ainda que maravilhados com o enorme sucesso da Física Quântica, a história aconselha-nos a não a aceitar como completa. Cremos que os exemplos que apresentámos são suficientes para mostrar como *os qualificativos certo, completo, indiscutível e outros similares não são adequados às representações científicas*. A despeito de haver concepções na história da Ciência que hoje se podem considerar inaceitáveis, as confrontações assumiram sempre um papel dialéctico e as ideias que delas resultaram constituíram sempre uma superação. Podemos dizer até que o progresso do conhecimento científico viveu tanto das ideias que triunfaram como das suas antíteses. *O erro, em Ciência, revelou sempre um aspecto dinamizador da evolução científica, como aliás sucede, também, na evolução do conhecimento de cada ser humano.*

A evolução dialéctica da Física e o papel dinamizador das concepções em confronto na construção do seu conhecimento também ficou bem patenteada ao analisarmos a evolução das ideias relativistas no capítulo anterior.

As teorias científicas, por maior que tenha sido o sucesso do núcleo fundamental do seu quadro conceptual, sempre revelaram aspectos problemáticos que estiveram na base da sua evolução. Digamos, em linguagem lakatosiana, que para além do núcleo duro sempre houve uma heurística que conduziu ao progresso ou à degenerescência. Com progresso e degenerescência foi ocorrendo a mudança conceptual ao longo do percurso da Ciência, foi assim que ela progrediu.

As ideias acerca dos aspectos mais ou menos complexos do mundo físico sempre se revelaram polémicas. E que dizer das representações acerca dos conceitos «simples»? À primeira vista parece que não haverá na Física, uma «ciência exacta» (cuidado com o significado desta designação!), lugar a concepções diferentes acerca dos seus conceitos mais fundamentais. Tal não é verdade e, para o fundamentarmos melhor, vamos centrar-nos no conceito de massa (um dos que mais profundamente estudámos).

4.10.1 Concepções alternativas na história da Ciência acerca do conceito de massa

Procedemos a uma análise da evolução do *conceito de massa*. Consultámos vários livros e comunicações recolhidas das mais diversas revistas científicas. Muitas destas comunicações são de índole histórica e outras procuram dar visões actuais acerca da massa. Dessa consulta, e da reflexão que nós próprios efectuámos, resultaram quatro artigos, dois dos quais são apresentados em anexo a este relatório de tese (Valadares, 1993, pp 9-14 e pp. 13-19). Vamos aqui resumir o mais possível algumas das concepções científicas que surgiram, e surgem ainda, acerca do conceito de massa.

Começamos pela obra lapidar da Física Clássica, os «*Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*», de Newton. A definição I que aparece nessa obra é a seguinte:

“A quantidade de matéria é a medida da mesma, obtida conjuntamente a partir da sua densidade e volume.” (Newton, 1990, p. 1).

Quase logo a seguir à apresentação desta definição, escreve Newton:

“É essa quantidade que doravante sempre denominarei pelo nome de corpo ou massa. A qual é conhecida através do peso de cada corpo, pois é proporcional ao peso, como encontrei em experiências com pêndulos (...).”

Para Newton, a **massa** de um corpo era a quantidade de matéria corpórea, tangível, já que Newton excluía intencionalmente o «éter», *“um meio, se é possível dizer que tal meio existe, que permeia livremente os interstícios entre as partes dos corpos”* (Ibidem, p.1).

Saltando a definição II dos *Principia*, que diz respeito à quantidade de movimento, passamos à definição III, que é a seguinte:

“A «vis insita» ou força inata da matéria, é um poder de resistir, através do qual todo o corpo, estando em determinado estado, mantém esse estado, seja ele de repouso ou de movimento uniforme em linha recta”. (Ibidem, p. 2).

E imediatamente a seguir comenta:

“Essa força é sempre proporcional ao corpo ao qual ela pertence, e em nada difere da inatividade da massa, a não ser pela nossa maneira de concebê-la. (...) Sob esse ponto de vista, essa «vis insita» pode ser chamada, mais significativamente, de inércia («vis inertiae») ou força de inatividade. Mas um corpo só exerce essa força quando outra força, imprimida sobre ele, procura mudar a sua condição”.

Esta citação mostra-nos que Newton associou a massa de um corpo à sua inércia, mas a rede conceptual envolvendo a massa continha *imprecisões e ambiguidades*.

Com efeito, por um lado *a inércia era considerada uma força que só existia quando o corpo era solicitado a alterar o seu estado de repouso e movimento rectilíneo uniforme*, e em “*nada diferia da inatividade da massa*”. Por outro lado, a massa “*era proporcional ao peso*”, logo existia em todas as condições.

Esta ambiguidade só se desfez ao diferenciar-se o conceito de massa em dois conceitos separados: o de *massa inercial*, associada à inércia do corpo, e o de *massa gravítica*, associada à gravidade e ao peso. O conceito newtoniano de massa era uma boa semente que frutificou e redundou numa grande árvore, mas para isso teve de se desenvolver e ser expurgado de contradições internas. (15)

Para além da ambiguidade do conceito newtoniano de massa e do seu significado metafísico como “*quantidade de matéria*”, que se prestou a uma série de interpretações incorrectas (Doménech, et al., 1993), esse conceito parecia encerrar logo à partida um ciclo vicioso, ao basear-se na densidade (como definimos a densidade?). (16)

O conceito de massa como medida da inércia só adquiriu alguma clareza com Leonhard Euler, que definiu operacionalmente a massa pelo quociente da força pela aceleração:

$$m = F/a.$$

Esta *definição de Euler* também é uma definição circular, já que, newtonianamente, define-se a força a partir da massa.

No final do século XIX, Mach procedeu a uma crítica dos conceitos newtonianos de espaço, tempo, inércia e força. Dadas as dificuldades conceptuais inerentes ao conceito de força, Mach tentou expurgar a Física desse conceito.

A solução de Mach passava pela definição operacional de massa à custa de grandezas exclusivamente cinemáticas. Para tal, baseava-se na interacção entre um corpo de massa a definir e um outro com massa padrão (ou já definida previamente). Verifica-se que, nessa interacção, o quociente das massas dos dois corpos é igual ao quociente inverso das respectivas acelerações. Tem-se

$$\frac{m}{m_p} = \frac{a_p}{a}$$

sendo a e a_p as medidas das acelerações do corpo e do corpo padrão respectivamente.

Com o ponto de vista operacional de Mach e de Bridgman, muitas das ambiguidades em que vivia mergulhada a Física foram resolvidas. Porém, a história encarregou-se de mostrar que a definição operacional de massa introduzida por Mach não resolveu para sempre as dificuldades inerentes a esse conceito, como vamos ver.

O resultado negativo da experiência de Michelson-Morley, destinada a provar o movimento absoluto da Terra no referencial do éter, e a não-covariância das equações de Maxwell para a transformação de Galileu, que estão na base da incompatibilidade lógica entre as equações de transformação de Galileu, as equações de Maxwell e o princípio da relatividade de Galileu, conduziram a uma das grandes crises da Física Clássica. (17)

Diversos físicos dos finais do século passado tentaram resolver essa crise no quadro newtoniano do espaço e do tempo absolutos. Entre esses físicos interessamos aqui destacar Abraham, Lorentz e Kaufmann, que consideravam os electrões com uma estrutura interna afectada pelo movimento a alta velocidade.

Primeiro Abraham, e depois Lorentz, apresentaram *duas teorias diferentes*: na teoria de Abraham os electrões eram considerados esferas indeformáveis, e na teoria de Lorentz eles eram considerados como esferas que se contraíam longitudinalmente para elipsóides de eixo menor na direcção do movimento. Essas teorias previam que “*o electrão se comporta como se tivesse a massa m_1 nos fenómenos em que intervém uma aceleração na direcção do movimento, e como se tivesse a massa m_2 quando a aceleração é perpendicular à direcção do movimento.*” (Lorentz, 1972, p. 30). E previam que essas massas m_1 e m_2 , rotuladas respectivamente de **massa longitudinal e massa transversal, variavam diferentemente com a velocidade**, dado o facto de a estrutura interna dos electrões ser diferentemente afectada consoante o movimento.

As previsões das duas teorias para as variações com a velocidade não coincidiam. A teoria de Lorentz, por exemplo, previa dependências das massas com a velocidade que podem ser traduzidas do seguinte modo (18):

$$m_1 = k \cdot (e^2/Rc^2) \cdot 1/(1-v^2/c^2)^{3/2}$$

$$m_2 = k \cdot (e^2/Rc^2) \cdot 1/(1-v^2/c^2)^{1/2}$$

onde R representa o raio do electrão, e a sua carga eléctrica, c a velocidade da luz no vácuo e $k = 1/6\pi$ (Ibidem, pp. 16-30 e 34).

As medições efectuadas por Kaufmann sobre os desvios sofridos pelos “*raios do rádio*” em campos eléctricos e magnéticos *não se revelaram conclusivas a favor de qualquer das teorias*, conforme Lorentz teve o cuidado de mostrar no final do seu artigo de 1904 (Ibidem, pp. 39-43).

Lorentz também afirmou que a massa de todas as outras partículas varia com a velocidade do mesmo modo que o electrão “*desde que se admita que as suas massas são influenciadas por uma translação no mesmo grau em que o são as massas electromagnéticas dos electrões*” (1972, p. 38).

Esta breve análise histórica do conceito de massa na Física pré-relativista é reveladora das concepções alternativas que envolveram esse conceito.

Por um lado, a massa de um corpo correspondia a aspectos diferentes que têm que ver com a inércia (Couderc, 1977, p. 92).

Por outro lado, a massa era fonte de gravitação e dela dependia a força gravitacional.

A equivalência entre estas massas era um facto meramente experimental e não uma asserção fundamental, como viria a acontecer na Teoria da Relatividade Geral. E, para além disto, subsistiam na Electrodinâmica Clássica as duas massas inerciais referidas, a massa transversal e a massa longitudinal, com expressões distintas consoante a teoria adoptada.

Quando Einstein escreveu, em 1905, o seu célebre artigo original onde estabeleceu a Teoria da Relatividade Restrita, abriu-se um novo quadro conceptual no qual o conceito de massa também foi integrado e evoluiu. A Teoria da Relatividade Restrita era um novo referencial conceptual no qual a massa passava a ser encarada de modo diferente. Nesse famoso artigo, ao tratar da “*dinâmica do electrão (lentamente acelerado)*” (1972, p. 83), Einstein obteve as seguintes expressões para as massas longitudinal e transversal do electrão (18):

$$m_1 = m_0 / (1 - v^2 / c^2)^{3/2}$$

$$m_2 = m_0 / (1 - v^2 / c^2)$$

Nestas fórmulas, m_0 é a massa do electrão “*enquanto o movimento for lento*” (Ibidem, p. 81).

É curioso notar que na determinação da fórmula da massa transversal, m_2 , Einstein até cometeu um erro de cálculo (o binómio do denominador devia estar elevado ao expoente 1/2). Foi Planck que corrigiu esse erro no ano seguinte.

Einstein, imediatamente a seguir à escrita das expressões das massas transversal e longitudinal, salienta o facto de que, *com outras definições para a força e para a aceleração, se obteriam outras expressões para as referidas massas*, o que “*mostra claramente que ele reconheceu a arbitrariedade da sua definição de massa*” (Jammer, 1961, p. 160).

No nosso artigo que consta do Apêndice 3 afirmamos que Einstein não atribuiu, nessa sua comunicação original sobre a Teoria da Relatividade Restrita, qualquer importância às massas longitudinal e transversal, e defendemos a tese de que ele *apenas as apresentou por cedência à polémica entre teorias rivais acerca do comportamento do electrão*.

Mais tarde, Einstein chegou mesmo a renegar a existência da massa dependente da velocidade ao afirmar, numa carta a Lincoln Barnet, que é “*melhor não introduzir outro conceito de massa a não ser o de massa em repouso*” (Adler, 1987, p. 742 e Okun, 1989, p. 32).

A representação mais coerente de Einstein sobre a massa, a única ideia que ele introduziu e acabou por sustentar ao longo da vida, é a de que **a massa de um corpo, medida da sua inércia, depende do conteúdo energético do corpo**, da energia que ele encerra. Corresponde, pois, à energia do corpo num referencial em que está em repouso.

Quando uma partícula livre se move com uma certa velocidade $\vec{v}$, ela possui a

energia cinética $mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$ (Einstein, 1972, p. 84). No entanto, além desta

energia dependente do referencial, possui também um conteúdo de energia equivalente à sua massa m , a **energia em repouso** $E_0 = m c^2$.

Consideremos dois referenciais inerciais, o referencial próprio (onde a velocidade é nula) e o referencial de laboratório, onde a partícula viaja a uma velocidade relativista $\vec{v}$. Neste último referencial há uma dilatação temporal relativista, aumentando o tempo dos fenómenos, em particular o tempo que a partícula leva a reagir a uma força e sofrer a consequente variação de velocidade. A partícula leva mais tempo nesse referencial a sofrer um dado aumento de velocidade, não porque a sua estrutura interna variou, não porque o seu conteúdo energético aumentou e, portanto, não porque a sua massa (como propriedade que tem que ver com a estrutura do corpo e conteúdo energético) aumentou. O motivo desse aumento do tempo para a mesma variação de velocidade é tão só a dilatação temporal relativista, como afirmámos. É um efeito cinemático e não dinâmico. Tem que ver com o tempo e não com a massa.

O verdadeiro significado da relação de equivalência de Einstein pode traduzir-se pela expressão

$$\Delta m = \Delta E_0 / c^2$$

onde m é a massa de um corpo, tal como se mede na Física Clássica, e E_0 é a energia que ele possui internamente (portanto independentemente de se mover ou não).

A massa varia com a energia que entra ou sai do corpo. Não varia com o referencial, e portanto com a velocidade do corpo. O momento linear do corpo depende do referencial escolhido porque a velocidade depende do referencial, não porque a massa depende do referencial. A velocidade depende do referencial porque se trata de uma grandeza cinemática dependente da distância percorrida e do tempo, que variam de referencial para referencial (como aliás já sucedia na Física Clássica relativamente à primeira destas grandezas).

Esta **concepção einsteiniana de massa** é coerente com a geometria espaço-temporal no espaço de Minkowski, onde a massa de um sistema de partículas

materiais é a grandeza do seu quadri-vector momento-energia, **independente do referencial inercial adotado**. Difere da energia total, pois esta é apenas a componente temporal desse quadri-vector, que depende do referencial (Taylor e Wheeler, 1992, pp. 224- 251).

À primeira vista parece que, após o próprio Einstein ter renegado a existência da massa relativista e dado o sucesso da Teoria da Relatividade, não seria de esperar qualquer divergência de ideias acerca da massa. Mas tal não corresponde à realidade.

Muitos físicos não abdicaram de considerar a massa de um corpo como uma grandeza dependente da velocidade. Max Jammer dedica o capítulo 12 da sua excelente obra «*Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*» à chamada **massa relativista** como sinónimo de **massa dependente da velocidade** (1961, pp. 154 a 171). A leitura do seu texto é reveladora de toda a ambiguidade que está por trás deste conceito. O físico A.P. French, do Massachusetts Institute of Technology, também se refere a ela no seu «*Curso de Relatividade Especial*» do MIT - (1988, p. 24).

Muitos outros físicos abandonaram o conceito de massa relativista. Alguns deles têm publicado artigos científicos a criticarem este conceito (Adler, 1987, Okun, 1989, Alcaine, 1989, Baierlein, 1991).

Recentemente, o físico Robert Bauman (1994, pp. 340 a 342), *para manter a aditividade da massa*, aceita a massa relativista da partícula,

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

salientando a sua limitação ao caso das partículas livres para as quais a massa em repouso é “*definida experimentalmente*”.

Bauman considera o caso particular em que a energia de um corpo pouco difere da sua energia própria, $E \approx E_0$.

Neste caso define a massa pela expressão

$$m = \frac{E_0 / c^2}{\sqrt{1 - \frac{2(E - E_0)}{E_0}}}$$

Para um corpo em repouso ($E = E_0$), esta expressão reduz-se à relação de equivalência

$$m_0 = E_0 / c^2 ,$$

Por outro lado, para uma partícula livre a velocidade moderada, a energia é a soma da energia em repouso da partícula com a sua energia cinética, pelo que temos

$$E = E_0 + \frac{1}{2} m_0 v^2$$

expressão esta equivalente a

$$\frac{2(E - E_0)}{E_0} = \frac{m_0 v^2}{m_0 c^2} = \frac{v^2}{c^2}$$

Assim, a equação de definição da massa atrás apresentada também acaba por se reduzir à massa relativista.

Outra concepção bastante original sobre a massa foi apresentada num dos últimos números da revista «*The Sciences*», da Academia de Ciências de New York, por três reputados cientistas: Bernhard Haisch, de um laboratório de pesquisa na Califórnia, Alfonso Rueda, professor da Universidade do Estado da Califórnia, e H. Puthoff, director do Instituto de Estudos Avançados de Austin (1994, pp. 26 a 31).

Segundo estes três cientistas, o conceito de massa perde o seu carácter fundamental e torna-se desnecessário em Física.

Se o ponto de vista deles estiver correcto, *“não há essa coisa a que se chama massa - apenas existe carga eléctrica e energia, que, em conjunto, criam a ilusão de massa. O mundo físico é constituído de cargas eléctricas, sem massa, imersas num campo electromagnético vasto, energético, que tudo penetra. É a interacção das cargas com o campo electromagnético que cria a aparência de massa”* (Haisch et al., 1994, p. 26).

Tentando ultrapassar as dificuldades levantadas à unificação do campo gravitacional com os outros campos de forças fundamentais, esses cientistas procuram libertar-se do campo gravitacional. Para isso tentam eliminar da Física o conceito de massa, já que como sabemos a massa é considerada a origem desse campo.

Há a propriedade da inércia, inseparável dos corpos, mas eles admitem que ela surge de um campo electromagnético que impregna toda a matéria, e a que chamam *campo do ponto zero*. Este nome provém do facto de que este campo existe mesmo no vácuo, à temperatura do zero absoluto, na ausência de radiação térmica. Essa energia de fundo do vácuo serve como referência ou ponto zero para todos os processos. (19)

Face a esta análise da evolução histórica de um conceito tão básico em Física como é o conceito de massa, julgamos poder afirmar que a Física é uma construção inacabada, é um conhecimento em devir, mesmo nos seus alicerces fundamentais. Houve e continua a haver representações alternativas em Física, mesmo a propósito dos seus conceitos mais básicos, tal como acabamos de ver.

4.11. Características gerais das concepções alternativas em Física

4.11.1 As concepções alternativas desempenharam um papel importante no desenvolvimento da Ciência

Vimos que as concepções alternativas dos alunos desempenham um papel importante na sua aprendizagem.

Também afirmámos que as concepções alternativas dos professores são importantes no modo como se processa o seu ensino.

Ora, a análise que fizemos acerca da evolução das ideias em Física permite-nos afirmar que as concepções alternativas estão inerentes a essa evolução e desempenharam um papel importante nela. Vamos fundamentar esta afirmação recorrendo à história da Física.

Sabemos que, antes de Galileu, imperou um paradigma geoestático e antropomórfico. Mas também sabemos que a ciência náutica viveu desse paradigma e que, do esforço crítico que ele desencadeou, muito lucrou a Ciência.

É sabido que a Física newtoniana, apesar de ter sido construída com base numa ideia obscura, que hoje consideramos um exemplo sugestivo de concepção alternativa na Ciência, a ideia de que existe um referencial absoluto ou referencial do éter, teve enorme sucesso. E é também sabido que a procura do fundamento dessa concepção duvidosa está na base do aparecimento da Teoria da Relatividade.

Também se sabe que a teoria corpuscular de Newton acerca da natureza da luz, que viria a ser superada um século depois de ter nascido, não impediu que importantes progressos fossem feitos em certas áreas da Óptica, como é o caso da decomposição da luz branca, por exemplo.

Um outro exemplo: Se não tivesse existido a polémica entre Galvani e Volta, a pilha eléctrica não teria surgido no ano de 1800.

A Ciência evoluiu através da confrontação e superação de ideias. Na confrontação de ideias antitéticas ambas desempenharam um papel dinamizador que contribuiu para a evolução da Ciência.

Sempre que apareceram teorias em confronto, como a ondulatória e a corpuscular, os cientistas esforçaram-se por resolver a «contenda». E desse esforço, muito beneficiou o conhecimento científico.

Afirmámos que a resolução dos problemas, a ultrapassagem das barreiras conceptuais, desempenham um papel importante no desenvolvimento cognitivo dos seres humanos. Pois, algo de paralelo se passa no desenvolvimento histórico da Ciência. Também aí a resolução dos grandes problemas científicos contribuiu para o seu progresso.

4.11.2 Muitas das concepções alternativas que surgiram na história da Física são iguais às que professores e alunos têm manifestado

Vimos, ao analisarmos as concepções alternativas dos alunos e dos professores, que muitas dessas concepções tinham também sido defendidas por cientistas em determinados períodos da história da Ciência.

Recordamos aqui a ideia de que um corpo em movimento exige uma força imprimida para se manter em movimento (4.2.1.4), ideia esta central na Física dos movimentos violentos de Aristóteles.

Lembramos também a concepção alternativa de que os corpos mais pesados caem mais rapidamente para a Terra (4.2.1.5), ideia essa que também era perfilhada por Aristóteles.

Referimos, a propósito do movimento balístico (4.2.1.4), que muitos alunos possuem a concepção alternativa de que os projecteis adquirem um ímpeto, à semelhança do que pensavam Jean Buridan e seus continuadores, particularmente Nicole Oresme.

Também referimos a ideia dos alunos de que existe um ímpeto circular nos corpos que descrevem círculos (4.3.2.1), e sabemos que Galileu também possuía uma concepção análoga.

Verificámos a persistência nos alunos da concepção alternativa sobre a massa designada por concepção OM (4.2.3.2), exactamente igual à que Newton possuía.

A pesquisa que desenvolvemos sobre as concepções alternativas dos alunos acerca da energia (Apêndice 5) mostra como muitas dessas concepções foram também perfilhadas por grandes cientistas.

Sabemos que muitos alunos ainda revelam possuir a noção de calórico, com a qual Carnot trabalhou nos fundamentos da Termodinâmica.

Vimos também o exemplo da radiação como forma de propagação de calor, que é uma das representações que perdurou na história da Ciência, tendo permanecido mesmo para além dos estudos de Maxwell acerca da radiação electromagnética. Ora essa representação perdurou e ainda perdura entre muitos professores de Física.

Falámos na teoria da emissão, com a qual determinados físicos tentaram explicar o resultado negativo da experiência de Michelson-Morley e vimos alguns professores também utilizarem essas mesmas ideias na interpretação do movimento de um sinal luminoso emitido por uma antena movendo-se num foguetão a uma velocidade relativista.

Enfim, multiplicam-se os exemplos que poderão servir para fundamentar a tese piagetiana da existência de um *isomorfismo entre as construções do conhecimento físico por cada indivíduo e ao longo da história*.

Esta tese constitui um dos grandes princípios epistemológicos que estão subjacentes a este trabalho e já a tínhamos procurado fundamentar no capítulo anterior.

Tivemos oportunidade de verificar, até mesmo em outras áreas da Física, que os estudos acerca das concepções alternativas nos fornecem muitos exemplos que apontam no sentido da validade dessa tese piagetiana.

4.11.3 Muitas das concepções alternativas que surgiram na história da Física revelaram uma enorme persistência

Uma das características que mais facilmente transparece na investigação das concepções alternativas dos alunos e dos professores é a enorme persistência destas.

Pois, tal como afirmámos na secção 4.3.3, também os cientistas têm revelado uma grande resistência à mudança das suas ideias. Clement (1979, p. 70) afirma mesmo que os cientistas são pelo menos tão resistentes à mudança conceptual como os estudantes.

Em 1961, Barber fez um estudo que mostrou a grande persistência de ideias em cientistas, já depois de tais ideias se terem revelado incorrectas (Gould, 1989, p. 66).

Gauber, um discípulo de Piaget, em Geneva, estudou o desenvolvimento das ideias de Darwin acerca do ser humano. Admirou-se com a relutância que Darwin tinha em mudar as suas ideias para outras mais consistentes com a evidência empírica. Gauber notou mesmo algumas semelhanças entre o comportamento de Darwin no que se refere à resistência à mudança conceptual e o que se observava com as crianças (Idem, Ibidem).

Temos conhecimento de cientistas que há anos tentam impor as suas teorias heterodoxas, em vários domínios (Termodinâmica, Teoria da Relatividade, etc.) e, apesar do ambiente por vezes hostil com que se confrontam, não desistem...

Sabemos, por exemplo, que Harlton Arp se viu obrigado a abandonar os Estados Unidos e ir trabalhar para o Instituto Max Planck por defender uma teoria cosmológica heterodoxa, mas, tanto quanto sabemos, nem por isso a abandonou.

Acompanhámos a história da concepção alternativa de que a radiação é um processo de propagação de calor e a sua persistência. Ainda hoje há muitos cientistas que consideram a radiação como um dos três processos de propagação de calor.

Quantos e quantos cientistas por esse mundo fora não continuam a considerar as forças de inércia como fictícias?

Segundo Kuhn, as mudanças paradigmáticas constituem autênticas revoluções científicas às quais a comunidade científica resiste e adere com relutância. Os exemplos da imposição da Teoria da Relatividade Restrita são sugestivos a este respeito. Ainda recentemente, num Congresso do GIREP em que participámos em Braga, um dos participantes afixou um «poster» a defender que a Teoria da Relatividade Restrita estava errada, e sugeria uma experiência para o comprovar!

Champanhe et al. (1980, p. 1078) destacam o paralelismo entre a relutância com que os cientistas iniciam uma reconceptualização com a dificuldade com que os estudantes de Física alteram as suas concepções alternativas.

4.11.4 As concepções alternativas em Física têm um carácter generalizado e homogéneo

São inúmeros os exemplos que poderíamos dar que mostram a homogeneidade e universalidade que caracteriza as concepções alternativas em Física.

Com efeito, a história mostra como as ideias de um cosmos obedecendo a uma ordem numérica, do movimento circular e perfeito das estrelas, do calórico e dos restantes fluidos imponderáveis, de ímpeto, de espaço e tempo absolutos e tantas outras actualmente inaceitáveis se espalharam por comunidades de pensadores conquistando adeptos. É esta uma das principais características que distinguem a concepção alternativa do erro *ad hoc*.

A exemplo do que sucedia com as concepções alternativas dos alunos e dos professores, há diversos motivos para que existam e se espalhem essas concepções. Conforme veremos na secção seguinte, esses motivos têm, no fundo, que ver com a própria natureza do conhecimento científico.

Na secção anterior, referimo-nos a várias concepções acerca da massa e demos preferência a uma. *Será que é legítimo rotularmos a concepção da nossa preferência de verdadeira e as outras a que chamamos de alternativas de falsas?* A resposta, em definitivo, é **não**!

Já argumentámos contra o facto de as concepções científicas se considerarem verdadeiras e a concepção de massa que defendemos não foge à regra. Qualquer concepção tem de ser analisada à luz do quadro conceptual em que nasceu.

A concepção newtoniana de massa, que se impôs durante muito tempo ao longo da história da Física, tinha coerência dentro do quadro conceptual da Física newtoniana em que surgiu. À luz desse quadro, revelava coerência. Funcionou. Tal como sabemos, com base nela e noutras concepções hoje inaceitáveis, construiu-se muita Física.

Todas as concepções históricas nos devem merecer, pois, a maior atenção e o mais profundo respeito. E mais do que isso: o conhecimento da génese de um conceito ajuda a compreender em profundidade o seu significado.

Por vezes acontece que, num dado momento, uma das representações acerca de um fenómeno ou de uma grandeza física é muito mais adoptada pela comunidade científica, que alguns físicos levam longe demais o seu apego a concepções alternativas que são num dado momento indefensáveis, mas a história mostra-nos que, *por vezes, as concepções alternativas que foram defendidas por poucos acabaram por ser as que vingaram.*

Neste último aspecto as concepções alternativas na Ciência diferem, totalmente, das concepções alternativas dos alunos. Estas, com toda a sua ingenuidade e espontaneidade, não têm condições para se impor, a não ser a eles próprios durante largos períodos de tempo. A história não revela que concepções defendidas por crianças e jovens tenham vingado como concepções científicas no futuro....

As concepções que a história da Ciência nos revela foram sempre defendidas com base em argumentos lógicos e com base na experiência. Quando a coerência lógica é posta em cheque e/ou a experiência as infirma, têm de ser abandonadas. A experiência é o grande juiz no debate entre as concepções, como sucedeu no caso da decisão entre as concepções corpuscular e ondulatória no século XVIII. Só que as experiências verdadeiramente cruciais nem sempre são possíveis de realizar com a exactidão desejável, e as concepções alternativas mantêm-se, como sucede actualmente no debate sobre a natureza do conhecimento do mundo quântico.

4.11.5 As concepções alternativas em Física têm subjacentes determinadas convicções geralmente de índole filosófica

Analisando as diversas representações que surgiram na história da Ciência, torna-se possível vislumbrar determinadas convicções **subjacentes**, geralmente de índole filosófica.

Assim, por exemplo, o atomismo está subjacente à teoria corpuscular de Newton, e por trás das concepções de Mach de massa e força está o operacionalismo. A confrontação entre as concepções energetista e atomista é, no fundo, uma confrontação entre filosofias diferentes. A concepção do movimento circular dos astros é platónica. As ideias indeterministas da Escola de Copenhaga têm um fundamento positivista e operacionalista. Acreditamos, e para referir um último exemplo, que à moderna concepção alternativa de que a massa não existe, que ela é uma ilusão proveniente da interacção das cargas eléctricas com um campo

electromagnético vasto, energético, que tudo penetra (Haisch et al., 1994), está subjacente uma filosofia energetista, ainda que não assumida conscientemente.

Vimos na secção 3.10.5 como o epicurismo e o estoicismo se repercutiram ao longo da história do pensamento científico, sendo assumidos, ainda que muitas vezes de forma velada, em várias fases da evolução desse pensamento.

Poderíamos recorrer a outros exemplos históricos, para além dos que já usámos, para ilustrar o facto de as convicções filosóficas de muitos cientistas influenciarem o seu trabalho, mas julgamos que já ficou suficientemente fundamentada a ideia de que tais convicções estiveram subjacentes às mais variadas representações científicas.

4.11.6 As concepções alternativas em Física enquadram-se numa determinada estrutura conceptual

Uma outra característica que possuem as concepções alternativas em Física é a sua **filiação numa estrutura conceptual**.

Um conceito, seja ele qual for, integra-se num quadro conceptual teórico, e só pode ser analisado uma vez bem definido esse quadro conceptual, isto é, o modo como esse conceito está entrelaçado com outros.

Quando, por força da mudança conceptual, há uma alteração do quadro conceptual em que estava integrado um determinado conceito, o significado deste muda.

É o que sucede, por exemplo, com o conceito de massa, que analisámos. A tabela da página seguinte revela-nos diversos quadros conceptuais em que o conceito de massa é diferente, com as principais características acerca da grandeza massa em cada um desses quadros:

Quadros conceptuais	Definição do quadro	Principais características do conceito de massa
Mecânica de Newton	Espaço e tempo independentes das propriedades dos corpos. Forças à distância entre os corpos em movimento no espaço absoluto. Inércia como «força» intrínseca.	Identidade não fundamental entre massa gravítica e massa inercial. Conceito ambíguo, não operacional, encerrando um ciclo vicioso.
Mecânica de Mach	Inexistência do espaço absoluto. Massas locais influenciadas pelas massas próximas do Universo. Inércia como resultado de um campo universal de massas.	Identidade não fundamental entre massa inercial e massa gravítica. Conceito sem ambiguidade, estabelecido operacionalmente.
Relatividade Restrita	Espaço-tempo a 4 dimensões, plano, quase-euclideano, relativo a cada referencial de inércia. Covariância das leis físicas para o grupo de Lorentz. (17)	Medida invariante do quadri-vector momento-energia. Equivale ao conteúdo de energia do corpo.
Relatividade Geral	Espaço-tempo curvo, cuja curvatura é definida pela distribuição e movimento dos corpos materiais.	Intimamente relacionada com as propriedades do espaço-tempo.

Quando falamos na massa newtoniana, referimo-nos a uma grandeza com as seguintes características:

1ª - É uma grandeza escalar e convencionalmente positiva.

2ª - É conceptualmente bivalente, pois há a massa que mede a inércia do corpo e a massa que contribui para a gravidade e força gravítica.

3ª - É experimentalmente única e, portanto, característica de cada corpo.

4ª - É universal, independente do espaço, do tempo e das interações, não variando de referencial para referencial. Em particular, é invariante para a transformação de Galileu entre referencias de inércia.

5ª - Obedece à transitividade, isto é, se dois corpos têm massa igual a um terceiro, têm massa igual entre si.

6ª - É aditiva, isto é, a massa do conjunto de dois objectos é a soma das massas desses objectos.

7ª - Define-se, como massa inercial, pela relação de Euler,

$$m = F/a$$

e, como massa gravítica, com base na lei newtoniana da atracção universal.

Com Mach, a concepção de massa alterou-se subtil, mas significativamente. Assim, a definição de massa inercial passou a ser estritamente operacional, com base na variação do momento linear de um corpo padrão de massa m_p e na expressão:

$$\frac{m}{m_p} = - \frac{\Delta \vec{p}_p}{\Delta \vec{p}}$$

O corpo padrão é arbitrário, já que a relação entre as massas de dois corpos não depende da massa tomada para padrão.

Actualmente, após 90 anos do nascimento da Teoria da Relatividade Restrita, a massa surge como um conceito com um significado diferente, devido ao facto de este conceito estar integrado num quadro conceptual diferente. As características da massa, **dentro desse quadro conceptual**, que defendemos, são as seguintes (Alder, 1987, Alcaine, 1989, Baierlein 1991, Okun, 1989, Taylor e Wheeler, 1992, Valadares, 1993):

1ª - É uma grandeza escalar e convencionalmente positiva.

2ª - É característica de cada corpo em determinadas condições energéticas internas, mas varia com estas.

3ª - Pode ser definida através da expressão

$$m = \sqrt{E^2 - p^2 c^2} / c^2$$

4ª - Coincide com a massa-energia que mede a inércia já que corresponde ao conteúdo energético no referencial em repouso.

5ª - Prevê massa nula para aquelas partículas que não existem em repouso, como é o caso dos fotões.

6ª - É invariante para a transformação de Lorentz.

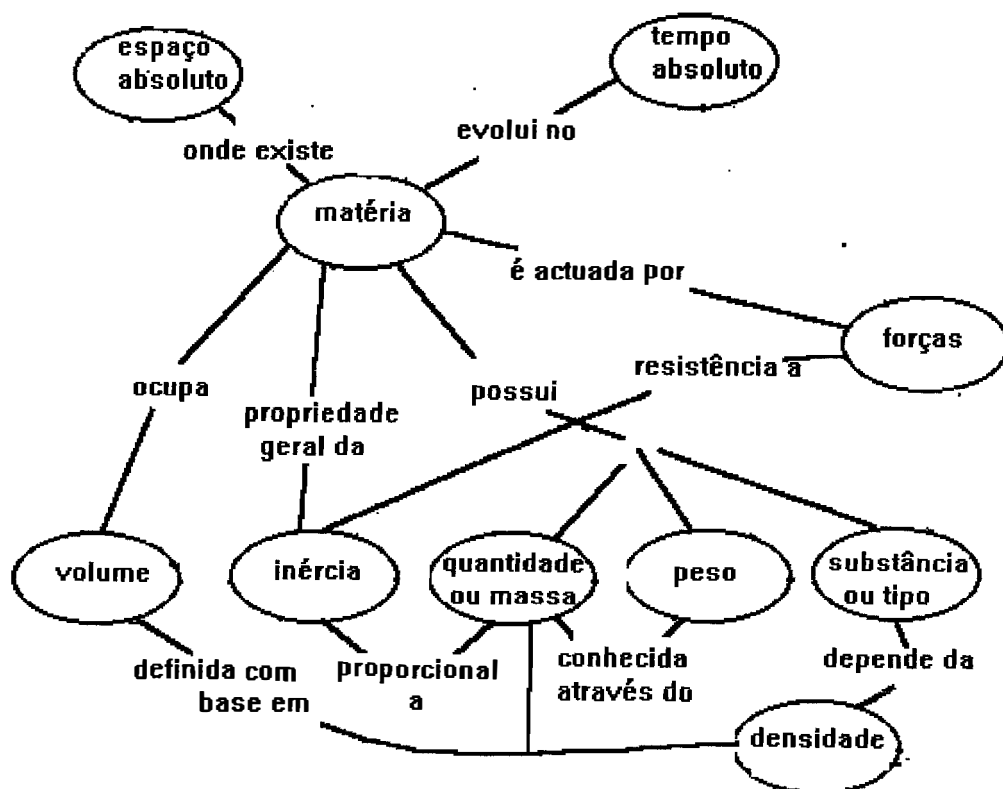
7ª - Contribui para a covariância das equações que traduzem as leis mecânicas no espaço-tempo a quatro dimensões.

8ª - Não é uma grandeza aditiva, uma vez que a massa de um sistema de partículas não é a soma das massas das partículas. Com efeito, todo o conteúdo de energia do sistema contribui para a sua massa, independentemente dessa energia estar ou não concentrada na forma de massa. Portanto, a massa do sistema no referencial

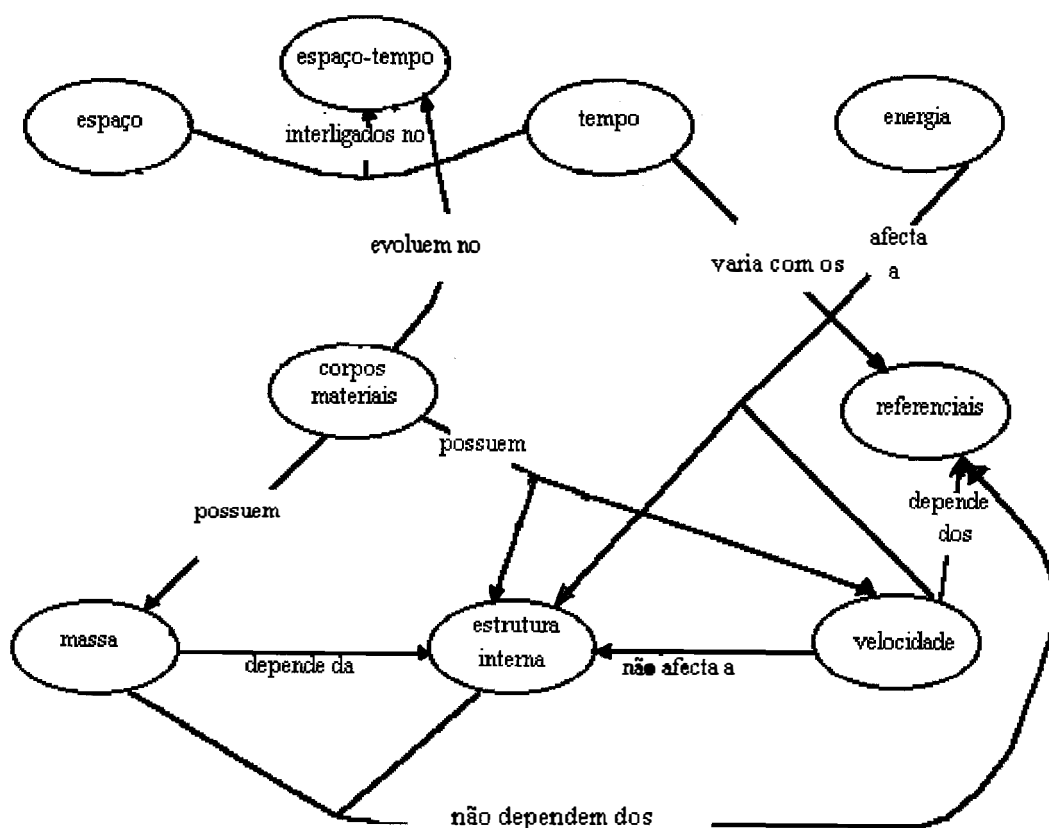
em que o momento total é nulo, é dada pela soma das massas das partículas com a energia cinética de agitação térmica:

$$M_{\text{sistema}} = \sum_{i=1}^n m_i + \sum_{i=1}^n E_{ci} / c^2 \quad (\text{no referencial em que o momento total é nulo})$$

Cada conceito físico está relacionado com outros segundo uma rede ou quadro conceptual que respeita uma determinada teoria. A figura seguinte, por exemplo, procura traduzir (através de um mapa tipo Novak intencionalmente aliviado para mais facilmente se comparar com o seguinte) o quadro conceptual em que se integra o conceito de massa da Física newtoniana:



A mudança nas teorias é obviamente acompanhada na mudança dos respectivos quadros conceptuais. Afirmamos então, com toda a propriedade, que ocorreu uma **mudança conceptual**, na qual teoria e conceitos se modificaram. Ao fim de uma evolução teórica «serena», que se traduz por pequenas reestruturações no quadro conceptual, poderá ocorrer uma revolução paradimática que conduzirá a uma alteração profunda. A teoria mudou radicalmente e com ela o respectivo quadro conceptual. Para ilustrar este facto, comparemos o quadro conceptual traduzido pelo mapa anterior com o que se segue, que tenta representar a rede conceptual em que o conceito de massa aparece integrado na Teoria da Relatividade Restrita:



Os mapas conceptuais permitem-nos, entre outras finalidades, visualizar quadros conceptuais, refiram-se eles á estrutura cognitiva de um indivíduo numa dada fase da evolução do seu conhecimento científico ou a uma teoria científica numa dada fase histórica.

Recorrendo aos mapas conceptuais, torna-se fácil mostrar, de modo transparente, se ocorreu ou não a **mudança conceptual num aluno**, uma vez que essa mudança se traduz por uma alteração no modo como os conceitos estão «ancorados» uns nos outros na sua estrutura cognitiva, ou seja na rede conceptual. E torna-se fácil, também, mostrar a ocorrência da **mudança conceptual na própria Ciência**, uma vez que a mudança se traduz por uma alteração no modo como os conceitos foram interligados cientificamente.

O que os dois mapas conceptuais anteriores pretendem traduzir é tão só as nossas representações pessoais acerca das representações científicas newtoniana (primitiva) e relativista acerca da massa. Se esses mapas traduzem, de facto, essas representações científicas, carece de ser validado pela certeza (que não temos) de que uma larga maioria da comunidade de físicos possuem representações análogas às nossas, concordando com os quadros. Essa validade é, tal como já afirmámos por diversas vezes, uma validade proporcionada pelo consenso de uma comunidade e não por qualquer critério de verdade que não existe.

Sabemos que há quem defenda representações diferentes acerca dum mesmo objecto, fenómeno ou conceito. Quando essas representações estão integradas coerentemente em esquemas conceptuais respeitáveis, o que quer dizer que ainda não revelaram de modo evidente incoerências internas e externas, devem merecer toda a nossa atenção. E, afinal, ainda bem que não atingimos consensos totais sobre todo o campo científico, não partilhámos todos exactamente das mesmas ideias. Se assim fosse, a Ciência era menos discutível, mas também menos apaixonante.

4.12 Origens das concepções alternativas nas ciências físicas

4.12.1 Na raiz das concepções alternativas está a natureza da Ciência

A história da evolução das ideias em Física fornece-nos múltiplos exemplos de concepções alternativas que foram surgindo ao longo do tempo e, desse facto, demos vários exemplos. Levantaram-se grandes obstáculos conceptuais no trabalho de grandes cientistas, de que recordamos alguns exemplos:

- Copérnico, o «pai» do modelo heliocêntrico, ainda continuava a distinguir entre movimentos naturais e violentos, bem como a existência de epiciclos e deferentes do modelo ptolomaico. Há mesmo concepções aristotélicas de que nunca se libertou.
- No trabalho de Kepler tiveram enorme peso as ideias clássicas de que as órbitas eram circulares e obedeciam a uma regularidade geométrica.
- Até atingir a fase mais evoluída do seu pensamento, Galileu teve que vencer enormes barreiras conceptuais, entre elas libertar-se da teoria do ímpeto que ele chegou a adoptar, de modo explícito, na sua obra *«De Motu»*.
- Antes de escrever os *«Principia»*, Newton encontrou “*sérias dificuldades conceptuais*”. Estas barreiras conceptuais revelaram-se mesmo bastante difíceis de serem ultrapassadas (Steinberg, Brown e Clement, 1990, p. 265).
- Grandes cientistas como Lorentz e Poincaré dispuseram de toda a ferramenta intelectual necessária para terem construído a Teoria da Relatividade Restrita, mas foram incapazes de se libertarem da ideia da existência de um éter electromagnético como suporte de um espaço absoluto.

Porquê estas barreiras conceptuais? Onde devemos procurar a sua origem?

A nossa resposta é esta: a grande origem das barreiras conceptuais que surgiram na construção da Ciência reside na própria natureza da Ciência. Para fundamentar esta afirmação, vamos começar por sintetizar alguns aspectos já focados acerca da natureza da Ciência que se revelam importantes, quanto a nós, para a origem das concepções alternativas.

De acordo com o paradigma construtivista, a Ciência não tem possibilidade de vir a conhecer teorias verdadeiras e completas acerca dos objectos/fenómenos. A verdade acerca dos objectos/fenómenos não é um objectivo da Ciência como se pensava até à primeira metade do nosso século.

Mesmo a Física teórica, assente na exactidão da Matemática, com todo o rigor que se lhe reconhece, não nos fornece a verdade acerca dos objectos/fenómenos. Fornece-nos, apenas, algumas verdades tautológicas, mas não as confundimos com os significados dos conceitos envolvidos, que é mutável e sempre discutível. A este propósito, Hans Reichenbach escreveu nas actas do IX Congresso Internacional de Filosofia o seguinte:

“As matemáticas não nos ensinam leis da natureza, mas regras, ligando diferentes fórmulas destas leis. A certeza matemática é, portanto, comprada pelo preço duma renúncia a todo o conteúdo. Não há conhecimentos sistemáticos a priori; todos os nossos conhecimentos são ou empíricos e incertos, ou analíticos e certos. Não há certeza fora das tautologias” (Martinho et al.,1970).

Não tendo como objectivo a verdade, a Ciência tem apenas a pretensão de ir progredindo no sentido de construir teorias cada vez com maior poder interpretativo e preditivo.

Quer dizer: uma teoria científica cinge-se a um conjunto de ideias que procura atribuir um significado a determinados fenómenos, é o fruto de uma negociação de significados entre os elementos de uma comunidade tendente a desenvolver “*um significado mutuamente compartilhado*” (Davis et al., 1993, p. 628).

A validade da Ciência é intersubjectual e não representacional. Tal como afirma Rosalind Driver, “*o critério para aceitação de uma teoria científica é que ela seja escrutinizada e aprovada pela comunidade de cientistas*” (1988, p. 4).

As teorias baseiam-se em conceitos, que são construções resultantes de regularidades percepcionadas nos objectos/fenómenos ou em registos dos mesmos, sendo certo que a cada conceito está associada uma designação.

O significado do conceito não reside na sua designação mas, sim, no modo como ele se relaciona com outros conceitos. São as afirmações em que intervém esse conceito que lhe dão significado (Novak, 1992, p. 1.7).

Assim, o que dá significado ao conceito newtoniano de massa, por exemplo, são afirmações como:

- massa é a quantidade de matéria de um corpo;
- a massa é directamente proporcional ao peso;
- a massa é o produto da densidade pelo volume;
- etc.

Quando o significado de um conceito é diferente do que tem validade intersubjectual, surgem concepções alternativas a respeito do mesmo.

O paradigma construtivista opõe-se ao positivismo, que ainda está arreigado em muitos pensadores, e segundo o qual a validade dos conceitos e das teorias da Ciência reside nos factos, isto é, nos registos válidos extraídos a partir dos objectos/fenómenos. Com efeito, de acordo com a filosofia construtivista da Ciência, *“a teoria não está relacionada de um modo dedutivo e único com as observações; pode haver múltiplas explicações dos acontecimentos, cada uma das quais corresponde aos mesmos factos”* (Driver, 1988, p.7).

No acto de passar dos objectos/fenómenos aos factos, há um factor pessoal que não pode ser evitado. Consequentemente, um facto para um investigador pode não o ser para outro. Há uma subjectividade inerente à recolha de factos, ainda que, a este respeito, as ciências ditas exactas levem grande vantagem sobre as outras (Ibidem, p. 11).

Não há um método de construir a Ciência. Os problemas, os princípios, as hipóteses, as teorias, os conceitos, as leis, os dados e os factos extraídos dos dados encontram-se envolvidos numa teia gigantesca em que todos dependem de todos. A Ciência está em permanente devir, já que os novos conhecimentos suscitam imediatamente novas questões e a resolução destas acaba por conduzir a novos conhecimentos. A componente conceptual do conhecimento (corresponde ao lado esquerdo do «vê» epistemológico de Gowin) está em permanente mutação. Esta permanente mutação resulta da aplicação da componente metodológica (ou seja do lado direito do «vê»).

A construção do conhecimento, prosseguindo sem fim, corresponderá a uma «parada de vê» (Novak e Gowin, 1991, pp. 152 e 153). O novo conhecimento implica novos conceitos, princípios e teorias, ou modificações das que existem. Esta alteração na componente conceptual vai influenciar a componente metodológica nas novas investigações.

Afirmámos que a Ciência está em evolução permanente. Mas como ocorre a sua evolução?

A nossa «leitura» da história da Ciência leva-nos a pertencer ao grupo dos adeptos do descontinuísmo epistemológico, de que o representante máximo é Kuhn. A Ciência evolui através de uma sucessão de paradigmas. Na vigência de um paradigma vive-se um período de «ciência normal», e a passagem de um paradigma para outro é «revolucionária». (Kuhn, 1970).

O descontinuísmo na evolução da Ciência não significa a ausência de continuidade. Assim, para caracterizar uma revolução paradigmática, vamos recorrer a um dos exemplos mais sugestivos: a «*revolução newtoniana*», estudada em profundidade por Cohen (1983).

Este notável historiador da Ciência destaca dois aspectos fundamentais que caracterizaram essa revolução:

1º - o desencadear da organização dos cientistas em sociedades formais permanentes com maior facilidade de comunicação entre eles;

2º - a tentativa de desenvolver uma nova atitude científica em que fossem rejeitadas todas as afirmações que não se aplicassem ao mundo das observações e das experiências.

Esta modificação profunda teve consequências importantes no que respeita à natureza das concepções alternativas. Até então predominavam as noções espontâneas, antropomórficas e geocêntricas que se assemelham, em conteúdo, às noções desenvolvidas pelo ser humano em fases primitivas da construção do seu conhecimento. A partir desse marco, o paralelismo entre a psicogénese e a filogénese verifica-se muito mais no que respeita aos mecanismos do que ao conteúdo do conhecimento (Piaget e Garcia, 1987, p. 38).

O que concluímos da análise das principais «revoluções científicas» é que elas englobam *continuidade, transformação e inovação* (Cohen, 1983, p. 304). Há

uma «nata» do conhecimento que vai sendo sempre transmitida de geração em geração e que resiste às grandes mudanças paradigmáticas. Os grandes princípios de conservação, por exemplo, resistiram à revolução einsteiniana. Mas há também transformação e inovação das ideias.

Assim, por exemplo, na revolução newtoniana há conceitos provenientes do século XIV que se mantiveram quase sem inovação e outros cujo significado foi modificado no novo paradigma (por exemplo, o conceito de «*vis impressa*»).

A inovação é, no fundo, consequência da transformação. Assim, “*mesmo as ideias mais «originais» tendem a ser transformações de outras mais antigas*” (Cohen, 1983, p. 305).

Mach também defendia que todas as inovações criadoras são essencialmente transformações. E Freud advogava que o surgir de muitas ideias criadoras resulta de uma «*criptomnésia*», isto é, da aparição, na consciência dos criadores, de imagens recordadas que não se reconhecem como tais, mais parecendo criações absolutamente originais, quando no fundo elas já existiam no subconsciente.

Em suma:

- A Ciência é o conhecimento do mundo em permanente devir que a comunidade científica vai construindo e reconstruindo e que, por consenso, melhor explica, mais sentido faz, a respeito dos objectos/fenómenos observados.
- O construtivismo produziu uma modificação no modo de encarar a Ciência. Assim:
 - o significado absoluto deu lugar ao significado contextual e intersubjectual; tal como afirmam muitos cientistas com boa formação filosófica, as teorias não são a verdade, mas modelos de aproximação à experiência;
 - a observação desapaixonada da Natureza que muitos pensadores acreditavam ser possível, desde Bacon a Pearson, é uma utopia;

- há aspectos que têm que ver com a criatividade e a intuição na construção das hipóteses, que o construtivismo realçou e que não foram convenientemente valorizados na visão anterior, positivista, da Ciência.
- O desenvolvimento conceptual no passado, as concepções que um cientista assimilou por culturação, o modo como elas foram por ele assimiladas, a sua experiência pessoal são factores que influenciam as ideias que esse cientista possui e, conseqüentemente, o modo como encara os fenómenos. A integração numa dada comunidade científica e, particularmente, numa equipa de investigação, pressiona-o intelectualmente, mas nem por isso faz com que ele partilhe, em absoluto, das ideias dos outros cientistas com quem negocia significados.

De acordo com o paradigma construtivista da Ciência, que oportunamente caracterizámos, e do qual acabamos de relembrar algumas ideias essenciais, os factos acerca de um determinado objecto/fenómeno são dependentes das preconcepções e não ditam univocamente uma teoria. Se o paradigma construtivista tem fundamento, não é então de admirar que tenham surgido as mais diversas concepções alternativas ao longo da construção da Ciência.

4.12.2 Alguns factores responsáveis pelas concepções alternativas na Física

As representações que cada cientista perfilha dependerão da sua experiência pessoal, da sua cultura e do modo como acontece a sua relação com os objectos/fenómenos. Este último aspecto é também importante já que “*o contexto de uma experiência tem um grande significado no significado dessa experiência*” (Novak, 1992, p. 2.2).

Para a construção do significado de uma experiência, cada ser humano (e o cientista não foge à regra) intervém de um modo idiossincrásico através do pensamento, dos sentimentos e da acção. “*Há uma interacção complexa, no nosso*

cérebro, entre os sistemas do conhecimento e do pensamento e os sistemas envolvidos na emoção e sentimentos” (Novak, 1992, p. 1.11).

Afirmado que na origem das concepções alternativas em Ciência está a natureza desta, vamos agora procurar de modo mais sistemático e explícito alguns factores que, influenciando o pensamento científico, provocam esse tipo de concepções.

1. A falta de um quadro conceptual inequivocamente determinado à partida

Já dissemos que as concepções científicas vão resultando de uma actividade permanente de formulação de problemas e das respectivas resoluções, sendo estas que vão originar novos problemas.

Ora, quer os problemas quer o modo como são resolvidos, logo as concepções resultantes, são influenciados, de modo profundo, pelos paradigmas em que os cientistas se enquadram.

Estes paradigmas mudaram ao longo da história e, por isso, mudaram as concepções.

Porém, também sucedeu que paradigmas em competição coexistiram, originando concepções distintas acerca dos mesmos fenómenos. Foi o que sucedeu com as diversas teorias que se confrontaram ao longo da história da Ciência.

Um conceito resulta das regularidades encontradas num fenómeno ou num objecto. As regularidades encontradas que conduzem ao conceito dependem de outros conceitos e teorias adoptados para descobrir essas regularidades. Isto tem como consequência que um conceito varia conforme o quadro conceptual em que é estabelecido.

O conceito de *massa* é um exemplo muito sugestivo para ilustrar o acto epistemológico de um conceito variar com o quadro conceptual em que se integra.

Para Newton, a massa de um corpo era uma grandeza que se identificava de certo modo com o corpo, particularmente com a quantidade de matéria que ele contém. De então para cá, o conceito foi evoluindo, foi-se diferenciando, a rede conceptual que o envolve foi-se modificando.

Com Euler, por exemplo, o conceito de massa passou a adquirir uma métrica muito clara ao ser relacionada com o quociente da força pela aceleração.

Com a Teoria da Relatividade Restrita, a evolução do conceito passou pelo que podemos considerar um corte epistemológico. Se até aí, tinha ocorrido apenas o que em linguagem ausubeliana se chama uma *diferenciação progressiva*, a partir de aí, houve uma *reconciliação integradora*, na medida em que o conceito de massa se interligou com o de energia, para darem lugar ao conceito mais abrangente de *massa-energia*.

Se quisermos referir-nos ao conceito de massa no seu estágio actual de evolução, não poderemos prescindir do quadro conceptual da Física relativista, pois teremos de definir o conceito já reconciliado integrativamente com o conceito de energia. Poderemos, então, afirmar que a *massa* de um corpo é a *grandeza equivalente (segundo a relação de equivalência de Einstein) ao conteúdo de energia própria do corpo, ou seja a energia do corpo no referencial próprio (onde ele está em repouso)*.

Quando quisermos apresentar o conceito de massa numa fase mais ou menos primitiva da sua evolução, teremos de deixar transparecer com toda a clareza qual o quadro conceptual referente a esse estado de evolução. E as pessoas com quem comunicamos, terão de se identificar com esse quadro conceptual. De outro modo resultam ambiguidades.

Um outro bom exemplo é o das *forças de inércia*. Consultámos diversos livros de Física muito divulgados, pelo menos nos países ocidentais, e que, portanto, poderão influenciar o pensamento dos físicos que os consultam. Que registámos?

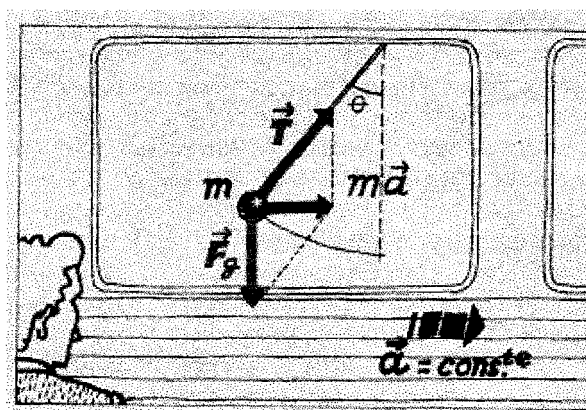
A grande maioria dos livros consultados afirmam que as forças de inércia são *fictícias* (Alonso e Finn, 1977, p. 314, Gettys, et al., 1989, p. 115, Martindale et al, 1992, p. 106, Kirkpatrick e Wheeler, 1992, p. 236, Serway, 1992, pp. 135 e 142, Fishbane et al., 1993, p. 105).

Outros, pelo contrário, consideram-nas *forças reais* (Greenberg, p. 88, Yavorsky e Pinsky, 1975, pp. 218 e 222).

Em que ficamos, são forças reais ou fictícias?

Começamos por criticar epistemologicamente quer uma designação quer outra. Se um pêndulo pendurado de uma carruagem a acelerar se inclina para trás, o que é real é a carruagem e o pêndulo. Toda a Ciência a que recorremos para interpretar o que se passa com esses objectos reais é uma construção humana e, como tal, não tem que ser ou deixar de ser considerado real ou fictício. É funcional ou não é funcional. É funcional se o modelo interpretativo for coerente com um determinado quadro teórico paradigmaticamente aceite e se se ajustar ao fenómeno.

Vamos começar por considerar o **quadro conceptual da Mecânica Clássica**, em que há um referencial inercial privilegiado - o *referencial em repouso absoluto*. Vamos considerar um observador ligado a um referencial considerado como tal, a observar um corpo ligado a um sistema móvel com aceleração, por exemplo uma carruagem.

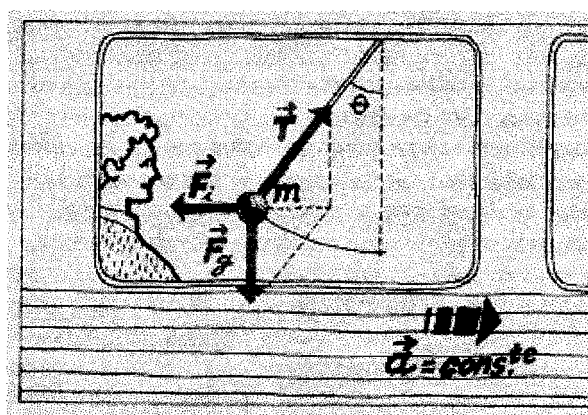


Para o observador inercial, o corpo de massa m tem a aceleração $\vec{a}$ da carruagem, e a sua interpretação é feita com base nas duas forças de interação, a força gravítica, $\vec{F}_g$, e a força de tensão do fio, $\vec{T}$. É a força resultante que imprime a aceleração $\vec{a}$ do corpo e tem-se, pela lei fundamental,

$$\vec{F}_g + \vec{T} = m \vec{a}$$

Como vemos, nesta interpretação não entra qualquer força de inércia.

Quando o observador entra para a carruagem, passa à condição de observador acelerado. Se este observador *considerar que a carruagem não se move* (como nós não consideramos a nossa casa a mover-se, ainda que ela possua aceleração em relação ao Sol), ele considera, então, que *a carruagem e o pêndulo estão em repouso relativo*.



Poderá então explicar o estado de equilíbrio do corpo, em relação a ele, recorrendo a uma terceira força, a **força de inércia**, $\vec{F}_i$, que, conjuntamente com as outras duas, dá origem a um sistema em equilíbrio:

$$\vec{F}_i + \vec{F}_g + \vec{T} = 0$$

Como estamos no quadro conceptual da Física Clássica, em que há um referencial privilegiado - o *referencial em repouso absoluto*, consideramos que o observador pode e deve considerar-se situado de fora nesse referencial absoluto, e privilegiar a primeira interpretação, sem força de inércia. Esta resulta de o referencial estar acelerado, o observador pode sempre dar conta que está acelerado e considerar a força de inércia um artifício matemático a que se recorreu para analisar uma situação «real» de movimento como se tratasse de uma situação «aparente» ou «fictícia» de repouso.

No **quadro conceptual da Teoria da Relatividade Restrita**, a situação não se modifica substancialmente. Em lugar de um referencial inercial privilegiado (o referencial em repouso absoluto não tem mais cabimento), há uma infinidade de referenciais de inércia privilegiados. O «estatuto» da força de inércia não se modifica.

Porém, a situação muda radicalmente, quando se passa ao **quadro conceptual da Teoria da Relatividade Geral**. Com efeito:

“Seja K um sistema de inércia. Todas as massas que estiverem suficientemente afastadas umas das outras e de outras massas, não terão, relativamente a K , aceleração. Consideremos, por outro lado, um referencial K' , uniformemente acelerado relativamente a K . Em relação a K' , todas as referidas massas terão acelerações iguais e paralelas; logo, relativamente a K' , elas comportam-se como se estivessem sujeitas a um campo de gravitação, e como se K' não tivesse a aceleração considerada. Não querendo discutir neste momento a «causa» de um tal campo de gravitação, de que nos ocuparemos mais tarde, nada nos impede, porém, de conceber este campo de gravitação como real; por outras palavras, supôr ou admitir que K' está «em repouso», e existe um campo de gravitação, é o mesmo que supôr que apenas K é um referencial legítimo e não existe nenhum campo de gravitação. Ao enunciado que exprime a completa equivalência física dos dois sistemas de coordenadas K e K' chamaremos «princípio de equivalência»” (Einstein, 1958, pp. 73 e 74).

Quer dizer: segundo o **princípio de equivalência**, o referencial «*carruagem acelerada*» é fisicamente equivalente ao sistema «*carruagem em repouso*», em relação ao qual existe um campo de gravitação de sentido oposto à aceleração do referencial.

Nas suas manifestações (essas constituem a realidade que observamos) “*as forças inerciais são indistinguíveis das forças gravitacionais*” (Yavorsky e Pinsky, 1975, p. 222).

Neste quadro conceptual, as forças de inércia adquirem uma importância interpretativa idêntica às forças de interacção gravitacional e adquirem toda a legitimidade.

Em suma:

Falar, em termos dogmáticos e absolutos nas forças de inércia como forças fictícias é, quanto a nós, incorrecto. Os conceitos só têm sentido quando analisados à luz de um quadro conceptual em que se integram.

Já a propósito das concepções alternativas dos professores e dos alunos tínhamos visto a importância da existência de um quadro conceptual bem definido à partida na construção do conhecimento individual. Pois também na construção histórica do conhecimento a existência de um quadro conceptual é determinante para as concepções que nele se integram.

As teorias científicas são conceptualmente integralistas, isto é, constituem redes conceptuais complexas em que os conceitos se relacionam, «encaixam» uns nos outros, de tal modo que o todo é afectado se qualquer das interligações se revelar incorrecta. A concepção determina o quadro conceptual. O quadro conceptual determina a concepção. Vamos recordar alguns exemplos deste facto:

No aristotelismo, Natureza e vazio estavam ligados através de uma relação de incompatibilidade («a Natureza tem horror ao vazio», o vazio não existe na Natureza). A partir do momento em que esta relação se revele incorrecta, o

aristotelismo, tal como foi concebido, torna-se inaceitável. Por isso, os aristotélicos não admitiam nem podiam admitir a existência do vazio.

Os atomistas, pelo contrário, admitiam a existência do vazio, já que tal conceito era absolutamente necessário para dar integridade ao quadro conceptual atomista.

Para explicar o movimento dos astros em torno do Sol, Descartes criou a *teoria dos vórtices*, segundo a qual os planetas giram devido aos vórtices produzidos num mar de éter que preenche todo o espaço. Neste quadro conceptual, a existência de átomos era absolutamente inadmissível. É uma questão de coerência do todo, já que no sistema cartesiano não há o vácuo que era considerado absolutamente necessário para a existência dos átomos.

Galileu esforçou-se por derrubar o paradigma aristotélico que ainda estava profundamente arreigado em muitos espíritos do seu tempo. Nesse quadro conceptual aristotélico, o movimento de queda era encarado como um movimento natural, ocorrendo com velocidade constante. Galileu mostrou que o movimento de queda de um corpo se faz, não com velocidade constante, mas com aceleração constante.

Como, na época de Galileu, ainda não existia qualquer outro sistema, mormente o sistema newtoniano de gravitação, onde há uma regularidade bem definida no modo como a aceleração da gravidade varia com a distância à Terra, na estrutura conceptual de Galileu acabou por se «encaixar» a concepção alternativa de que *a aceleração de queda de um corpo para a Terra é constante, seja qual for a distância a que o corpo se situe, inclusivé à distância a que a Lua se encontra de nós* (Cohen, 1983, pp. 41 e 181).

Ainda um outro exemplo. Schrodinger não aderiu ao paradigma da Escola de Copenhaga. Esforçou-se por enquadrar os novos conhecimentos do mundo quântico num quadro conceptual realista e causalista, tal como Einstein e de Broglie. Daí o facto de defender concepções hoje consideradas alternativas, tais como:

- as ondas de matéria são ondas em tudo comparáveis às ondas electromagnéticas e sonoras;
- a emissão luminosa é devida à interferência de duas excitações simultâneas correspondentes a duas vibrações estacionárias. (Horsfield, 1984, p. 812).

2. A influência das crenças e convicções metafísicas

Vimos como as crenças e convicções metafísicas influenciam o pensamento dos alunos e dos professores. Essa influência fez-se sentir, também, na construção da Ciência ao ponto de esses factores serem os causadores de algumas concepções alternativas. Vimos vários exemplos ilustrativos dessa influência na construção do conhecimento científico. Recordamos, aqui e agora:

- a ideia de espaço absoluto e tempo absoluto, que Newton introduziu por razões místicas;
- a associação de Kepler das órbitas dos planetas aos sólidos regulares, por convicção filosófica;
- a deformação dinâmica dos electrões em movimento a alta velocidade, que um dos últimos grandes físicos clássicos, Lorentz, possuía por se encontrar «agarrado» ao paradigma clássico, galilaico (secção 4.8);
- a introdução de Einstein de uma constante cosmológica *ad hoc* por convicção dogmática no carácter estacionário do Universo;

Vamos agora ver apenas mais dois exemplos:

Galileu, profundamente embrenhado na sua descoberta da queda em movimento com aceleração constante (em oposição à queda em movimento uniforme do aristotelismo), passou a acreditar na existência de um ponto algures no espaço (sem especificar onde), do qual Deus havia deixado cair todos os planetas. Com uma aceleração constante, a velocidade de cada planeta teria aumentado até ao valor que possui na órbita respectiva. Foi assim que nasceu a representação alternativa de Galileu acerca das velocidades diferentes dos planetas.

Kepler, por sua vez, defendia que a «*anima motrix*» que actua em cada planeta perde força à medida que aumenta a distância ao Sol. Mas, de acordo com a sua convicção metafísica, as órbitas deveriam ser circulares e não elípticas (a pequena excentricidade das elipses significava imperfeições da simetria que Deus quis dar às órbitas dos planetas). Considerava, então, que a força imprimida num planeta diminuía proporcionalmente ao círculo ou órbita, portanto com a distância (em vez de diminuir com o quadrado da distância, conforme o modelo gravitacional de Newton viria a admitir necessariamente).

Todos estes exemplos mostram bem que as ideias dos cientistas são influenciadas por crenças e convicções dogmáticas e metafísicas. Estes factores estão na origem de algumas ideias que podem ser consideradas alternativas em determinados momentos da história da evolução da Ciência.

2. A influência de factores de índole predominantemente psicológica

Do mesmo modo que sucede com as concepções alternativas dos professores, também podemos falar em **aspectos psicológicos** envolvidos na construção das ideias pelos cientistas e, portanto, nas concepções alternativas dos mesmos. Todo o cientista, por mais que pretenda objectivar o seu trabalho, não deixa de ser influenciado por factores emocionais profundamente enraizadas na sua mente.

Por outro lado, vimos como a teoria psicológica ausubeliana prevê a possibilidade de um ser humano apreender um significado incorrecto de um objecto/acontecimento de um modo inteligente, isto é, integrando-o significativamente dentro de uma estrutura conceptual pré-existente. Esta é que é incorrecta.

Para além disso, a Psicologia experimental mostra de modo inequívoco como a apreensão perceptiva de um objecto/acontecimento não é mais do que um esboço ou esquema do mesmo. Há constrangimentos psico-físicos e psico-fisiológicos que fazem sentir os seus efeitos. A passagem do facto-bruto ao facto-científico, e a consequente criação do modelo susceptível de ser sujeito à análise matemática (ou mesmo à análise numérica suportada pelo computador) corresponde a uma abstracção simplificadora da complexidade do fenómenos, que, do ponto de vista científico, é absolutamente vital, condição da máxima objectividade possível e da fecundidade da investigação. Porém, do ponto de vista psicológico, essa matematização dos objectos/acontecimentos do mundo exterior corresponde a um empobrecimento dos mesmos, já que eles são sempre irredutíveis em absoluto aos mecanismos envolvidos.

Para atingir a máxima objectividade possível, a Ciência recorre aos mais sofisticados aparelhos científicos. Porém, não nos devemos esquecer que qualquer técnica está sujeita a erros, quer perceptuais quer conceptuais. Mesmo com os aparelhos mais sofisticados, colocam-se limitações que fazem com que o facto-científico perca a exactidão e objectividade absolutas.

Uma dessas limitações reside na própria natureza do mundo quântico e no esoterismo da Física que lhe corresponde. É que os aparelhos que se usam e a própria linguagem com que se comunica, para se tornar inteligível, integram-se na Física Clássica e não na própria Física Quântica. Estabelecem-se, assim, bloqueios de informação, que correspondem a desvirtuamentos da própria realidade tal como ela é concebida pela Física.

Outra limitação provém da complexidade do cérebro humano que faz intervir factores subjectivos tais como as emoções, as expectativas e os referenciais teóricos do observador (Horsfield, 1984, p. 812, Driver, 1988, p. 11).

Após a passagem do facto-bruto ao facto-científico, em que os elementos qualitativos foram transformados em elementos quantitativos com as incertezas inerentes, toda a ênfase da investigação se centra, já não no fenómeno complexo, mas no seu modelo matematizado. Ora, os modelos teóricos, manejáveis matematicamente, não traduzem os aspectos complexos do mundo real, não abarcam toda a complexidade dos fenómenos. Daí Ziman ter afirmado que “*a Física pode descrever a realidade, mas não pode espelhá-la*” (1978, p. 27).

A história da Ciência fornece-nos sugestivos exemplos de como os cientistas por vezes registam não o que vêem, mas o que pensam que estão a ver. São os «olhos da mente» a funcionar e, não, apenas os olhos normais.

No estabelecimento dos factos-científicos e na construção, a partir deles, de conceitos e leis, há uma dialéctica entre o objecto e o intelecto do cientista em que este é dominado por outras componentes da complexidade que ele constitui, particularmente pelos sentimento, emoções e paixões, a que alguns ainda preferem chamar, quanto a nós incorrectamente, a componente irracional. Já Polanyi, em 1956, afirmava que *a paixão desempenha um papel importante no avanço da Ciência* (Novak, 1992, p. 3.29).

A componente tradicionalmente considerada não racional foi considerada importante na produção de ideias científicas decisivas por grandes pensadores como Einstein e Popper (Horsfield, 1984, p. 810). Essa componente tem contribuído para que cientistas se agarrem a representações muito pessoais, diferentes das que são comungadas pela comunidade científica em geral. Quem não viu o modo apaixonado como alguns cientistas tentam impor as suas ideias alternativas em congressos?

Na evolução do conhecimento ao longo da história, tal como na evolução do conhecimento em cada ser humano, levantam-se barreiras psicológicas ao desenvolvimento do pensamento. Algumas das dificuldades que enfrentaram Copérnico, Kepler, Galileu, Newton e muitos outros cientistas são boas provas disso.

Porém, tal como afirmámos, as concepções alternativas resultantes dessas barreiras psicológicas também se constituíram em focos dinamizadores do progresso da Ciência.

O conhecimento científico evoluiu dialecticamente através da confrontação de ideias: as ideias que evoluíram para estádios mais desenvolvidos; e as suas antíteses, as ideias alternativas.

3. A influência de factores de índole sociológica.

É por demais evidente a influência, ora positiva ora negativa, que a sociedade teve e tem na evolução do pensamento científico. As crenças de um povo, os seus hábitos de vida, a linguagem, o poder político instituído, o progresso social e tecnológico, tudo isto são factores que influenciaram a investigação e o surgimento de novas ideias.

Não foi por acaso que os gregos revelaram o pensamento crítico que revelaram e tiveram uma predilecção pelas ideias abstractas mais do que pelas técnicas rudimentares. Era uma civilização próspera que se tinha espalhado desde a Ásia Menor até ao sul de Itália, com vestígios no sul de França e até de Espanha. Thales, por exemplo, era um rico homem de negócios da cidade comercial de Mileto e Platão pertencia a uma família aristocrática e teve oportunidade de efectuar longas viagens culturais antes de fundar a Academia e influenciar notavelmente o pensamento filosófico.

Também não foi por acaso que a Idade Média constituiu, de certo modo, uma longa «travessia do deserto» e ocorreu posteriormente o período renascentista e o surgir de um novo espírito científico. Um grande investimento numa formação humanística, uma das grandes preocupações dos povos do ocidente nos dois séculos que antecederam o surgimento da Ciência Moderna, com a descoberta da literatura clássica e o estudo da língua grega, foi um factor preponderante.

O aparecimento da imprensa - o mais antigo livro impresso na Europa ocidental data de 1447 (Debus, 1978, p. 6)- foi outro factor decisivo.

A história intelectual de Galileu, as ideias que perfilhou, estão profundamente marcadas pela sociedade em que viveu. A vantagem social de aumentar o rendimento da máquina a vapor contribuiu para o progresso da Termodinâmica.

Quem leu a autobiografia de Einstein e a sua obra *«Como vejo o mundo»*, fica a saber que Einstein foi influenciado por literatura filosófica e científica do seu tempo. A dificuldade que muitos membros da comunidade científica e diversos filósofos sentiram em aderir à Teoria da Relatividade tiveram que ver com factores de natureza psicológica (dificuldades relacionadas com o peso do senso comum) mas também com factores de natureza política.

Um factor também importante e que gostaríamos de destacar foi a predilecção que certos pensadores tiveram pelas chamadas «ciências ocultas», na qual incluímos a Astrologia, a Magia natural e a Alquimia. Particularmente, grandes sábios dos séculos XVI e XVII eram adeptos dessas ciências (Kepler era astrólogo e Newton era alquimista, para citar dois exemplos). Como é evidente, o peso dos factores sociológicos fazia-se sentir muito mais nesse tempo do que na actualidade, já que hoje os cientistas trabalham de um modo geral integrados em projectos de investigação. A crítica permanente que resulta do trabalho em equipa, o papel das sociedades científicas e das revistas científicas (onde os *referees* procuram defender a ortodoxia) e das grandes conferências internacionais tem um efeito moderador, colocando na sombra muitas das concepções «anticonvencionais».

Porém, ainda hoje aparecem notícias como a da *produção da fusão nuclear fria*, onde imperam concepções que devemos considerar alternativas, quando analisadas à luz da Ciência actual. Para isso contribuem factores complexos, até a ânsia que muitos cientistas têm em ser famosos (o orgulho e, mesmo em muitos casos, a vaidade, são inerentes à condição humana dos cientistas).

A importância que hoje se atribui à trilogia **Ciência-Tecnologia-Sociedade** e tudo o que sobre ela se tem escrito é sintomático da importância dos factores sociais na produção do conhecimento, e, inversamente, da importância da produção do conhecimento na Sociedade.

As expectativas da Sociedade são tão grandes, a premência de encontrar remédios para os grandes males que afligem a humanidade neste virar de milénio, a necessidade de descobrir novos e potentes recursos energéticos, o desejo, enfim, de resolver rapidamente todos os problemas que afligem a humanidade pressionam de tal modo a comunidade científica que não será de estranhar que continuem a surgir no seio dela mais algumas concepções alternativas...

4.13 Conclusões acerca das concepções alternativas em Física

O estudo que efectuámos acerca da evolução das concepções físicas ao longo da história, quando confrontado com o estudo que efectuámos das concepções alternativas no ensino da Física, conduz-nos às seguintes conclusões:

1ª - Há, de facto, um *paralelismo entre a construção de significados pelos seres humanos e a construção do conhecimento físico ao longo da história da ciência*.

2ª - Também na história das ideias acerca do mundo físico surgiram representações mais ou menos espontâneas, mais ou menos alicerçadas no senso comum, que

precederam as concepções da Física Clássica, e que constituíram obstáculos ao desenvolvimento dessas concepções. É o caso das ideias aristotélicas, antropomórficas e geocêntricas, e da ideia de ímpeto, entre outras. Vimos, por exemplo, como Galileu começou «enclausurado» na teoria do ímpeto (Bruno, também) e Kepler esteve «amarrado» a ideias pitagóricas. Também é conhecido o facto de Copérnico possuir representações aristotélicas, quando estabeleceu o seu modelo, continuando a distinguir entre movimentos naturais e violentos. Em relação a estes últimos movimentos, aceitava a argumentação aristotélica de que deveriam resultar consequências catastróficas do heliocentrismo. Porém, argumentava fragilmente que o movimento da Terra e dos objectos terrestres eram possíveis, por tais movimentos serem «movimentos naturais». Era, segundo ele, a razão por que os pássaros, as núvens, as pedras acompanham o movimento da Terra (Koyré, 1955, pp. 187 e 188).

3ª - Para construir novas concepções sobre o Universo e a Ciência, houve necessidade de vencer «*barreiras enormes do pensamento ao pensamento*». Foi o que aconteceu, por exemplo, com a revolução newtoniana, que conduziu à chamada *Ciência Moderna*. Porém, é difícil apreciarmos, em toda a sua grandeza, os obstáculos à construção das novas concepções da Natureza e da Ciência Moderna. E porquê? Koyré fornece-nos a resposta. “*É porque conhecemos demasiado bem os conceitos e os princípios que formam a base da Ciência Moderna. ou, mais exactamente, porque nos habituámos demasiadamente a eles*” (Ibidem, p. 183).

4ª - Como muitas das concepções da história da Ciência têm características semelhantes às concepções alternativas detectadas e estudadas nos alunos e nos professores, porque resultam, como elas, da própria natureza da Ciência e, porque, além disso, sofreram influências análogas de ordem psicologia e sociológica, entendemos por bem designar essas concepções, do mesmo modo que fizemos atrás, por concepções alternativas.

5ª - Os modelos que surgiram na história da Ciência têm, em geral, relativamente aos modelos dos alunos, um carácter muito mais abrangente, isto é, procuram aplicar-se a uma gama extensa de fenómenos e não a situações particulares. A invariância, a coerência, a parcimónia e a funcionalidade são características que os modelos científicos procuram possuir, nem sempre com sucesso.

6ª - Os modelos científicos são, em geral, simbólicos, procurando usar uma linguagem formal, e são escrutinizados, ao contrário dos modelos dos alunos que são muitas vezes apenas verbais e não são escrutinizados. Como tal, os modelos científicos são mais reflexivos e mais lógicos. Isso não significa que os modelos alternativos dos alunos não sejam universais e coerentes de aluno para aluno.

7ª - Muitas concepções alternativas em Ciência também se revelaram persistentes e, por vezes, ingénuas, como as dos alunos, e existiram mesmo nos cientistas do mais alto expoente, como Copérnico, Kepler, Galileu, Newton, Einstein, por exemplo.

8ª - Aquando da construção de novos conhecimentos, as ideias e as associações de ideias, isto é, o referencial conceptual que os cientistas possuem, revelam-se, como vimos, decisivos para o modo como são construídas as novas ideias. Há aqui um paralelismo enorme com o que sucede com os professores e alunos de Física onde a sua estrutura cognitiva se revela decisiva para o modo como são apreendidos os novos conceitos.

9ª - Os cientistas tentam sempre compreender as novas ideias científicas com base nas ideias científicas que já possuem. Há sempre a tentativa de integrar as novas ideias num quadro conceptual pré-existente. Se esse quadro apresenta deficiências conceptuais, os cientistas podem acabar por construir inteligentemente ideias inaceitáveis, do mesmo modo que os estudantes de Física podem construir inteligentemente representações incorrectas se dispuserem, à partida, de estruturas cognitivas com conceitos mal interligados.

CAPÍTULO V

JUÍZOS DE ÍNDOLE COGNITIVA E DE VALOR EDUCACIONAL IMPLICAÇÕES NA EDUCAÇÃO CIENTÍFICA DOS ALUNOS DE FÍSICA

5.1 Introdução

No capítulo 2, formulámos a seguinte questão - **questão foco** - para a qual nos propusemos procurar uma resposta bem fundamentada:

Como é que as representações que os professores de Física do nosso país «negoceiam» com os alunos se relacionam com a ciência física e a reflexão que sobre essa ciência é feita na Epistemologia?

Dada a natureza desta questão, obrigámo-nos a uma reflexão sobre a Filosofia da Ciência, de que resultou o capítulo 3 deste trabalho, onde formulámos determinados princípios filosóficos básicos que aqui recordamos em síntese:

1º Princípio - A ciência física não pode ter como objectivo o conhecimento pleno da realidade exterior (secção 3.4).

2º Princípio - Há uma dialéctica entre a razão e a experiência no estabelecimento da ciência física (secção 3.6).

3º Princípio - A Física é uma construção humana e dialéctica resultante da interacção entre o sujeito e o objecto, entre o pensamento e a acção (secção 3.8).

4º Princípio - O conhecimento físico de cada ser humano é uma construção pessoal e idiossincrásica (secção 3.9).

5º Princípio - O pensamento vulgar antecede o pensamento científico e constitui um obstáculo à construção deste (secção 3.11).

6º Princípio - Há um isomorfismo entre a construção do conhecimento físico por cada indivíduo e a construção do conhecimento físico ao longo da história (secção 3.12)

7º Princípio - Não há um método científico, mas, sim, uma atitude científica. Hipóteses, modelos e experimentação interagem não linearmente (secção 3.13).

8º Princípio - As teorias físicas têm um valor normativo e não um valor axiológico (secção 3.16).

9º Princípio - A demarcação entre Ciência e não-Ciência nem sempre é nítida (secção 3.17).

A coerência entre estes princípios e toda a informação proveniente da pesquisa que efectuámos, quer sobre a história da Ciência quer sobre as concepções alternativas no ensino da Física, teve como consequência um fortalecimento da nossa convicção na validade desses princípios. Cremos que eles deverão ser tidos em conta por todos os responsáveis que, pela sua actividade, de algum modo interferem na educação em Física, desde os autores dos *curricula* até aos professores.

5.2 Resumo de algumas conclusões extraídas deste trabalho

No capítulo 4 estudámos as concepções alternativas dos alunos de Física, dos professores de Física e da própria ciência física e encontrámos respostas para diversas sub-questões que formulámos na secção 2.2 de modo a operacionalizar a questão foco.

Assim, depois de analisarmos nas secções 4.3 e 4.4 as características e origens das concepções alternativas dos alunos de Física, apresentámos na secção 4.5 um resumo das conclusões que extraímos dessa análise.

Nas secções 4.7 e 4.8 debruçámo-nos sobre as características e origens das concepções alternativas dos professores de Física e apresentámos na secção 4.9 as conclusões obtidas.

Finalmente, nas secções 4.11 e 4.12 discutimos as características e origens das concepções alternativas que surgiram na própria ciência física e as conclusões a que chegámos estão discriminadas na secção 4.13.

Quando iniciámos esta investigação dispúnhamos já de alguns conhecimentos acerca da existência de determinadas concepções alternativas nos alunos de Física, tínhamos um vago conhecimento de que os professores também possuem concepções alternativas, mas nunca tínhamos ouvido falar em concepções alternativas na própria Física.

Uma das mais importantes conclusões a que chegámos é que, **como consequência da natureza do próprio conhecimento físico, surgem concepções alternativas quer na construção histórica quer na construção pessoal desse conhecimento.** Foi a homogeneidade quanto às origens e características, e, muitas vezes até, no que respeita ao conteúdo, entre as concepções alternativas dos alunos de Física, dos professores de Física e muitas das concepções da própria história da Física que nos conduziu à conclusão anterior.

Sabíamos e confirmámos que as concepções alternativas dos alunos se revelam como representações mais ou menos empíricas, mais ou menos estruturadas, mais ou menos apreendidas significativamente por eles e que são incoerentes com as que a Ciência mostrou serem funcionais em termos de interpretação do mundo exterior.

Reconhecíamos uma diferença significativa entre as concepções alternativas, sistemáticas, disseminadas por muitos alunos, independentes de diversos factores como a nacionalidade, sexo, tipo de formação e ambiente cultural do aluno, e os erros *ad hoc* provenientes de descuidos, falhas de conhecimento algorítmico, etc.

Porém, quisemos ir mais além e acabámos por interpretar a diferença entre concepções alternativas e erros *ad hoc* nos seguintes termos:

- as concepções alternativas consistem em deficientes interligações de conceitos numa rede conceptual com fundamentação na própria natureza da Ciência, sendo provocadas por factores de natureza predominantemente epistemológica, psicológica ou sociológica;
- ao contrário, as falhas pontuais e *ad hoc* ou de conhecimento algorítmico não se fundamentam na natureza da Ciência, tendo causas perfeitamente aleatórias.

Foi a análise, com base em exemplos, das características e origens das concepções alternativas no ensino da Física e da própria Física, bem como o reconhecimento da existência de algumas origens e características comuns, que nos levou a suspeitar que, no fundo, a origem de todas essas concepções é a própria natureza do conhecimento científico. É, quanto a nós, o facto de as concepções alternativas, quer em Física quer no seu ensino, se fundamentarem na natureza construtivista e dialéctica do próprio conhecimento físico que faz com que essas concepções apresentem algumas origens e características comuns, e que, muitas vezes até, sejam idênticas no que respeita ao conteúdo.

Vamos, então, procurar resumir as principais conclusões a que chegámos acerca das características e origens comuns a todas as concepções alternativas, isto é, às que se têm descoberto no ensino da Física e às que consideramos terem surgido na história da Física.

Começemos pelas *origens* de todas essas concepções. Essas origens têm que ver, como dissemos, com o processo do conhecimento. Podem ser:

- do foro predominantemente *epistemológico*, como, por exemplo, os diversos obstáculos que Bachelard analisou, desde o pensamento vulgar ao pensamento holístico, passando pelo obstáculo realista ou substancialista, as crenças e

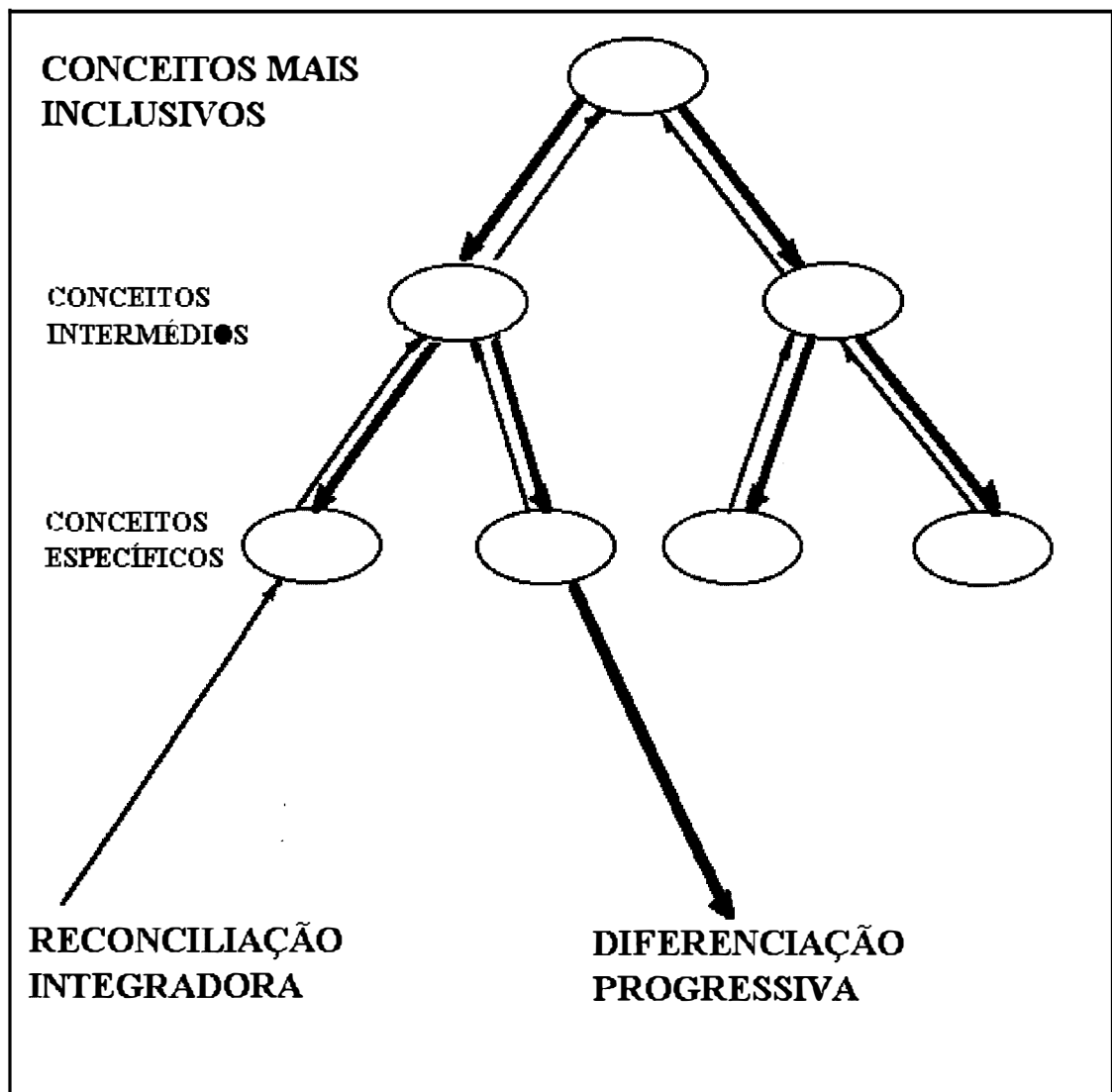
convicções metafísicas, a não existência de um quadro conceptual rigorosamente definido à partida, no fundo todas as dificuldades inerentes ao mau funcionamento da relação epistemológica sujeito-objecto;

- de natureza predominantemente *psicológica*, como sejam, por exemplo, as que se referem à própria natureza da percepção humana, às deficiências da estrutura conceptual pré-existente, à influência da componente afectiva na racionalidade, ao efeito psicológico de preconceitos, às consequências psicológicas das más experiências de apreensão dos conceitos que formam a rede conceptual (na consciência científica ou na mente humana) que, por exemplo, não têm em conta a importância da problematização constante e da resolução dos problemas, no fundo tudo o que influencia por via psicológica os complexos mecanismos da inteligência humana;
- de índole fundamentalmente *sociológica*, quando estão relacionadas com o contexto social, as crenças e os hábitos, a linguagem, a existência de nichos culturais, etc., no fundo com todos os bloqueios de ordem social, e são muitos.

Segundo o 6º princípio atrás formulado (a que gostaríamos de chamar princípio de Piaget, em homenagem ao investigador que, pela primeira vez, o defendeu), há um isomorfismo entre as construções do conhecimento físico individual e histórico. Em ambos os casos ocorre uma *mudança conceptual* segundo *mecanismos semelhantes*. Este trabalho permitiu-nos não só fundamentar este princípio, mas também sistematizar as seguintes características e mecanismos que estão inerentes à mudança conceptual quer na construção individual quer na construção histórica do conhecimento:

- a mudança conceptual não se baseia apenas na aquisição de informação quer directamente através da experiência vivida quer indirectamente por transmissão cultural, havendo sempre uma mediatização a partir do conjunto de ideias previamente existentes;

- tal mudança é comandada pela ecologia conceptual, para adoptar uma designação de Toulmin (1972), isto é, pelo conjunto de conceitos pré-existentes;
- ocorre uma modificação da estrutura conceptual pré-existente, com base em diferenciações progressivas e reconciliações integradoras de conceitos (Novak);



(Representação do modelo ausubeliano de diferenciação progressiva e reconciliação integradora, Moreira e Buchweitz, 1993, p. 27)

- em termos de raciocínio, há alternância contínua entre abstrações empíricas (colhem informações nos objectos) e reflexivas (actuam a partir de acções e operações do sujeito) e as generalizações, quer construtivas quer extensionais (Piaget e Garcia, 1987, pp. 18 e 38);
- as novas estruturas de pensamento reflectem e integram as antigas estruturas.
- a mudança é construída com base em êxitos e fracassos, fases de equilíbrio e de ruptura epistemológica, dependendo do modo como se relacionam as estruturas de pensamento com os dados experimentais;
- a mudança está sujeita a obstáculos epistemológicos endógenos, isto é, que são inerentes à própria natureza do pensamento científico.

Segundo Piaget e Garcia (Ibidem, p. 38), a *homogeneidade nas concepções alternativas pessoais e históricas* estende-se até ao *conteúdo* delas, principalmente em estádios primitivos de desenvolvimento conceptual. Confirmámos, de facto, a existência de uma correspondência bastante estreita, mesmo a nível de conteúdos, entre a evolução das noções históricas pré-newtonianas e a evolução psicogenética das noções nas crianças.

O trabalho que desenvolvemos permitiu-nos ficar a conhecer melhor quais são as ideias que os alunos possuem acerca dos conceitos e dos fenómenos físicos, e que são semelhantes a outras surgidas ao longo da história da Ciência. Podemos recordar aqui e agora as seguintes:

- concepções aristotélicas acerca da queda dos graves;
- ideias análogas às da teoria do ímpeto;

- ideias acerca de uma inércia circular, semelhantes às que Galileu possuía;
- ideias acerca do calor, semelhantes às dos adeptos da teoria do calórico;
- ideias causais sobre a energia, que alguns cientistas revelaram também possuir;
- etc.;

As concepções alternativas dos alunos sempre se revelaram persistentes, resistindo à mudança. Pudemos concluir que o mesmo sucede com as concepções alternativas que os professores possuem e com as que surgiram no desenvolvimento da Ciência.

Pudemos verificar que muitas concepções alternativas, quer da Física quer do seu ensino, revelam o efeito bloqueador do senso comum e da vivência do dia a dia, particularmente o geocentrismo e antropocentrismo resultantes da nossa ligação a uma Terra em repouso relativo e no centro da abóboda celeste.

Uma afirmação que fizemos e que consideramos importante, tanto do ponto de vista epistemológico como educativo, é que **as concepções alternativas desempenharam e desempenham um papel importante no modo como é construído o conhecimento, individual ou historicamente. As novas ideias vão depender dos referenciais conceptuais pré-existentes.**

Se é um facto que verificámos existirem muitas semelhanças entre as concepções alternativas na Física e no seu ensino, também registámos que essas concepções apresentam algumas diferenças. Assim:

- há diferenças no que respeita à sua pretendida abrangência - as concepções alternativas dos alunos são por eles aplicadas em fenómenos quase sempre muito particulares; os professores e os cientistas, pelo contrário, procuram abarcar com as suas concepções fenómenos gerais;

- há também diferenças no que respeita à consistência das concepções alternativas - as da ciência revelam, em geral, maior consistência, pois apoiam-se em maior reflexão, logo em sistemas conceptuais mais solidamente estabelecidos;
- há ainda diferenças no que respeita à espontaneidade das concepções alternativas - elas são geralmente mais espontâneas nos alunos do que nos professores e do que na ciência física.

5.3 Conclusões retiradas das respostas à escala de graduação («rating scale») administrada a professores

A fim de tentar extrair algumas conclusões sobre as ideias dos professores de Física portugueses do ensino básico e secundário acerca da natureza do conhecimento físico, e, ao mesmo tempo, indagar em que medida os principais pressupostos epistemológicos inerentes a este trabalho serão ou não compartilhados por eles, elaborámos um instrumento fácil de utilizar e analisar: uma escala de graduação («rating scale»). Para poder utilizar a escala com um número minimamente significativo de professores, obrigámo-nos a efectuar três acções de formação, duas no 4º Encontro Ibérico sobre o Ensino da Física, realizado na Covilhã, e outra organizada pela Sociedade Portuguesa de Física em Santarém e destinada a professores da província do Ribatejo. No início de cada acção, pedimos aos professores presentes o favor de preencherem a escala de graduação e, durante a acção, houve oportunidade de debater com os professores presentes algumas das afirmações sobre as quais foram convidados a pronunciar-se. Conseguimos, deste modo, que a escala fosse preenchida por um total de 108 professores.

No Apêndice 2 apresentamos a escala utilizada, onde são feitas nove afirmações acerca das quais os professores se debruçaram, acabando por assumir uma das seguintes posições: discordância convicta, discordância sem grande convicção, concordância sem grande convicção, ou concordância convicta.

Os gráficos dos resultados obtidos, afirmação por afirmação, são apresentados também no Apêndice 2.

As conclusões, necessariamente de carácter provisório devido à falta de validação da escala, que retirámos das respostas dos professores são as seguintes:

1ª afirmação - A ciência física não pode ter como objectivo legítimo o conhecimento pleno da realidade exterior.

A maioria dos professores discordou deste princípio, e cerca de 25% convictamente. Os resultados confirmaram a ideia que tínhamos (fruto da longa experiência de contacto com eles) de que muitos professores de Física do ensino básico e secundário têm uma visão demasiado realista da Ciência. Cremos que este excessivo realismo será também apanágio de muitos físicos e professores universitários de Física, mas não dispomos de dados que nos permitam apoiar esta nossa suposição.

2ª afirmação - Há uma dialéctica entre a razão e a experiência no estabelecimento da ciência física.

Os professores concordaram plenamente com este princípio, o que leva a supor que a visão filosófica dos professores acerca da metodologia da Física concorda com a que possuímos: nem demasiado racionalista nem demasiado empirista. Devemos confessar que esta verificação nos surpreendeu, já que tínhamos à partida a ideia de que a posição dos professores seria demasiado empirista. Até que ponto esta posição a respeito da origem e da metodologia do conhecimento se apoia em bases firmes é algo sobre o qual não investigámos.

3ª afirmação - A Física é uma construção humana e dialéctica resultante da interacção entre o sujeito e o objecto, entre o pensamento e a acção.

4ª afirmação - O conhecimento físico de cada ser humano é uma construção pessoal e idiossincrásica.

Os professores concordaram plenamente com a visão construtivista da Física contida na primeira das afirmações, mas já foram muito menos convictos no que respeita ao carácter construtivista e idiossincrásico do conhecimento individual. Uma explicação provável para a referida falta de convicção é que ela se fique a dever a uma visão demasiado objectiva da Física, como construção humana. Se a Física é objectiva, como compreender que ela seja apreendida de modo subjectivo, idiossincrásico?

De qualquer modo, uma coisa é certa: há muitos professores que têm uma visão pouco actual da apreensão individual do conhecimento. Isso reflecte-se no modo como encaram o seu ensino.

5ª afirmação - O pensamento vulgar antecede o pensamento científico e constitui um obstáculo à construção deste.

A respeito deste princípio bachelardiano, os professores dividiram-se. Exactamente 50% concordaram com ele, e 50% discordaram. Tal facto não nos surpreendeu. Os próprios filósofos da Ciência do nosso século não estão todos de acordo com este princípio. Os filósofos continuistas entendem o pensamento científico como uma continuidade do pensamento vulgar. Popper, por exemplo, considera o pensamento científico como “o senso-comum esclarecido”. O estudo histórico que efectuámos sobre o conhecimento e o metaconhecimento em Física, uma vez confrontado com a reflexão sobre as concepções alternativas no ensino da Física, sobre os conhecimentos da chamada Epistemologia genética, bem como da Psicologia cognitivista e construtivista, levou-nos a aceitar o princípio bachelardiano como correcto.

6ª afirmação - Na comunidade dos físicos e dos professores de Física campeiam ideias demasiado realistas e empiristas

Esta questão é um desafio à reflexão epistemológica dos professores sobre eles próprios e acerca do meio social em que trabalham, que é, no fundo, o mundo da educação no domínio das ciências físicas. Os professores revelaram posições divergentes a respeito dela. Porquê? Há algumas hipotéticas explicações que mereciam ser trabalhadas:

- uma residirá na fraca formação epistemológica de muitos professores de Física;
- outra poderá residir na diferença entre ser empirista e ser realista; afinal a resposta à primeira questão mostra que muitos professores têm ideias demasiado realistas, mas a resposta à segunda questão deixa antever que eles não são empiristas.

7ª afirmação - Há um isomorfismo entre a construção do conhecimento físico por cada indivíduo e a construção do conhecimento ao longo da história

Esta questão também se revelou muito polémica e perto de 15% dos professores nem sequer responderam. Este princípio piagetiano está muito para além das conjecturas de quem não tiver uma sólida formação histórica e epistemológica, o que pressupõe conhecimentos acerca dos mecanismos psicológicos da apreensão do conhecimento.

8ª afirmação - Não há um método científico, mas, sim, uma atitude científica. Hipóteses, modelos e experimentação interagem não linearmente

Apraz-nos registar que os professores revelaram, uma vez mais, uma posição fundamentalmente coincidente com a que possuímos face à metodologia da Ciência.

Esperamos que essa posição, que se afasta do paradigma indutivista e positivista que dominou e ainda domina grande parte do pensamento científico, sirva para eliminar de vez do ensino pseudo-métodos de «descobrir a Ciência».

9ª afirmação - A demarcação entre a Ciência e a não-Ciência nem sempre é nítida

Pusemos de parte o difícil problema da validade do conhecimento físico, fundamentalmente por duas razões. Em primeiro lugar, porque não era fácil definir em poucas palavras as posições antitéticas a respeito dele, de modo a que os professores tomassem uma posição face a ele. Em segundo lugar, porque ele não está dissociado do primeiro problema, que já tinha sido tratado. Cingimo-nos, portanto, apenas ao problema da demarcação da Ciência face ao qual a posição de cerca de 90% dos professores se revelou correcta, do nosso ponto de vista.

5.4 Juízos de índole cognitiva

A investigação que efectuámos começou pela fundamentação de determinados princípios filosóficos que serviram de apoio à reflexão acerca das concepções alternativas que se encontram espalhadas pelo ensino e pela aprendizagem da Física, bem como acerca das ideias que surgiram na própria evolução da Física e que se revelaram diferentes das que paradigmaticamente se impuseram como concepções científicas.

Como atrás dissemos, a reflexão que efectuámos reforçou no nosso espírito a convicção na validade da filosofia subjacente a este trabalho.

Quando alguém procura construir conhecimento, não parte com um «espírito tábua rasa» nem conclui tudo por si. Assim, as conclusões que anteriormente apresentámos a respeito das concepções alternativas resultaram em grande parte da experiência e conhecimento que possuíamos à partida e sobretudo de muita informação entretanto recolhida das mais variadas fontes, e de que fomos dando testemunho ao longo desta dissertação. Certamente que alguns dos conhecimentos adquiridos influenciaram muito mais as nossas ideias do que outros, e isso ficou patente até pelas citações que fomos fazendo ao longo deste trabalho.

Face à representação que possuímos acerca da natureza do conhecimento e que nos esforçámos por explicitar, diremos que a reflexão que efectuámos assentou na interacção dialéctica entre as nossas ideias prévias («contaminadas» pela nossa experiência de professor) e a informação proveniente do exterior e de cujas fontes mais decisivas fomos dando conhecimento. É essa mesma interacção que nos permite agora formular os seguintes *juízos de índole cognitiva* no que respeita à questão desta investigação:

- **O ensino que um professor de Física ministra nas suas aulas é, de facto, uma «negociação» no sentido de uma sempre hipotética comunhão de representações acerca dos objectos/fenómenos do mundo físico em estudo. O professor serve-se das suas próprias representações acerca dos objectos/fenómenos, que «moldou» através da sua assimilação pessoal das ideias pretensamente científicas dos autores dos livros e dos mestres que serviram de base à sua preparação. A «moldagem» dessas representações, bem como a sua «manipulação», é influenciada por convicções epistemológicas.**
- **Quer o conhecimento do professor, quer o do aluno, à semelhança do que sucede com o conhecimento físico desenvolvido ao longo da história, são sempre incompletos e imperfeitos, devido à própria natureza da ciência física.**

- As representações que os professores de Física procuram compartilhar com os seus alunos nas aulas nem sempre se identificam com as representações cientificamente aceites, havendo divergências que têm fundamento na natureza do conhecimento científico, sendo influenciadas por factores oportunamente discutidos. Além disso, mesmo que o professor disponha de representações cientificamente correctas, o aluno acaba muitas vezes por não as compartilhar com o professor.
- Não é, portanto, suficiente que o aluno revele aceitar inquestionavelmente um determinado corpo de conhecimentos que lhe foi transmitido de um modo considerado cientificamente correcto. Torna-se necessário, para que haja a mudança conceptual pretendida, que esse corpo de conhecimentos seja incorporado de modo substantivo numa rede de conceitos estruturados de modo correcto na sua mente e, além disso, que a nova informação fique incorporada de modo tal que a alteração produzida na rede conceptual (devido ao carácter integrativo da assimilação do conhecimento) seja efectuada de modo cientificamente correcto.
Portanto, pode haver aprendizagem, mas ser mecânica, e haver mesmo aprendizagem significativa, mas ser incorrecta.
- De modo paralelo ao que sucede na história da Física, as representações do professor e do aluno acerca dos objectos/fenómenos modificam-se através de um processo dinâmico em que o quadro conceptual do sujeito cognoscente (a sua estrutura cognitiva) se vai modificando. Há fases de relativa estabilidade e acalmia, em que a diferenciação dos conceitos prossegue, mas eles continuam a «encaixar» bem uns nos outros. Há outras fases de ruptura, de conflito, em que os conceitos «teimam em não encaixar» uns nos outros, o que acaba por redundar numa alteração profunda da rede conceptual prévia.

- Tal como sucedeu na evolução histórica das ideias acerca do mundo físico, o referencial conceptual pré-existente, as crenças e os pressupostos metafísicos, as atitudes, as emoções e os sentimentos, a influência cultural, os hábitos e a linguagem são determinantes na construção das representações acerca dos fenómenos pelos seres humanos.

Consequentemente, as concepções, a linguagem e os pressupostos subjacentes ao conteúdo e metodologia dos materiais em que o professor se apoia e ao seu discurso junto dos alunos revelam-se como factores decisivos quanto ao modo como o professor ensina.

De igual modo, as características e as concepções à partida de cada aluno, as suas crenças e pressupostos metafísicos, os hábitos e toda a sua componente afectiva são decisivos quanto ao modo como ele vai reagir à negociação de significados que o professor lhe propõe através das estratégias que adopta. Assim sendo, uma estratégia de ensino pode mostrar-se adequada a um aluno e desadequada a outro.

- A aprendizagem do aluno, principalmente porque também exige de quando em quando mudanças conceptuais profundas, autênticas revoluções no pensamento, é um processo difícil, como difícil foi sempre a mudança de paradigma na história da Ciência. Verificou-se sempre uma «inércia» no que respeita à mudança de paradigma na Ciência. Há também uma «inércia» intelectual em todo o ser humano. Essa inércia intelectual, essa dificuldade de mudança conceptual tem diversos fundamentos. Os que julgamos poder confirmar são os seguintes:

- há bloqueios epistemológicos, psicológicos e sociológicos à mudança conceptual, de que demos vários exemplos neste trabalho (deficiências da estrutura cognitiva, crenças, pensamento vulgar, pensamento holístico, influência cultural, etc.);

- muitas das concepções alternativas que existem na mente foram apreendidas significativamente, integraram-se de uma maneira sólida nas redes conceptuais que nela existem, alteraram essa rede de modo substantivo, numa palavra, ficaram profundamente interiorizadas;

- as estratégias de ensino são, muitas vezes, erradas e os discursos e materiais de ensino mostram graves deficiências que reforçam, em vez de atacarem, nos seus pontos fracos, os sistemas conceptuais alternativos, até porque encerram, eles próprios, algumas vezes, concepções alternativas.

- A mudança conceptual de cada aluno tem características que se assemelham às da mudança de paradigma ao longo da história. O recurso à história da evolução das ideias em Física e, particularmente, a análise das mudanças históricas de paradigma, permitem-nos corroborar as seguintes características da mudança conceptual :

- ela assenta, por um lado, na aquisição de nova informação, quer directamente da experiência quer indirectamente por transmissão cultural e, por outro lado, na interacção dialéctica entre essa nova informação e as estruturas do pensamento nas quais interfere uma componente afectiva e volitiva;

- é, portanto, determinada pela chamada «ecologia conceptual», e influenciada pelo modo como ocorre a interacção entre a mente e os dados sensoriais, bem como por factores endógenos;

- engloba fases de ruptura epistemológica, com alterações profundas na estrutura cognitiva, sendo dificultada por obstáculos epistemológicos, psicológicos e sociológicos;

- processa-se através da modificação da estrutura cognitiva, que engloba diferenciações progressivas e reconciliações integradoras de conceitos;

- assenta na alternância permanente de «abstracções empíricas» e «abstracções reflexivas», bem como em «generalizações construtivas» e «generalizações extensionais»;
- processa-se através da mudança das estruturas de pensamento com a reflexão e integração das antigas estruturas nas novas estruturas.

5.5 Juízos de valor educacional

A educação científica é um fenómeno social complexo e tem decorrido de modo geralmente insatisfatório nos mais diversos países (1). É utópico pretender traduzir em meia dúzia de frases os aspectos que poderão contribuir para a sua valorização. Isso não é impeditivo que, em consonância com os pressupostos filosóficos adoptados e com as conclusões do estudo efectuado, possamos formular a seguir alguns juízos que mais não são do que uma chamada de atenção para certos aspectos que deverão ser tidos em conta em qualquer tentativa de rentabilização da educação científica. Esses juízos de valor educacional são os seguintes:

- **A educação científica é um processo pelo qual um ser humano vai mudando o seu significado pessoal acerca da experiência, como resultado da actividade neural que ocorre no seu cérebro, e se traduz por uma modificação da rede de conceitos interiorizados.**
- **O acto de educar dirige-se ao aprendiz e centra-se nele, mas é altamente influenciado pela *governança*, que inclui o meio social que rodeia o aprendiz, pelo *curriculum*, pelo professor e pela avaliação.**

- O pensamento, os sentimentos, as emoções, as paixões e a acção intervêm em toda a actividade humana e, particularmente, na educação, de um modo decisivo. (2)
- O conhecimento tem uma natureza construtivista assente nos objectos/acontecimentos e na mente humana com toda a sua complexidade, e exige criatividade para conjecturar, construir hipóteses, experimentar, conceptualizar e problematizar.
- O fortalecimento do poder de conceptualizar em apoio às percepções sensoriais e do poder de problematizar conduz a uma melhoria da educação científica.
- Uma boa relação educativa, assente na lealdade, honestidade, auto-estima e respeito mútuo, é fundamental para que se crie na sala de aula um ambiente propício à boa aprendizagem. (3)
- A educação em Ciência sairá valorizada se se fundamentar em pressupostos filosóficos actuais, em particular se se tiver em conta que a razão científica, contrariamente ao que defendia o positivismo, é histórica, psicológica e sociologicamente condicionada.
- Na educação científica, muitas ideias diferentes das que a Ciência aceita são elementos potencialmente construtivos que, quando bem explorados, poderão contribuir para a valorização educativa.
- A investigação dentro e fora da aula pode contribuir para a melhoria da educação se for guiada por uma teoria epistemologicamente bem fundamentada, e não por um pretenso «método científico».

5.6 Implicações na educação científica dos alunos de Física

Um dos princípios mais consensuais da educação actual é que o aluno é o protagonista da sua aprendizagem. Dele se exige o maior empenhamento, a maior determinação em aprender significativamente. Mas esse empenhamento depende muito de factores exógenos, dos quais o mais importante diz respeito às *condições* em que o ensino decorre, portanto depende do que Gowin designa por *governança*. Depende também grandemente do *curriculum prático*, que inclui os próprios materiais que o aluno utiliza na sua aprendizagem, do *professor* que o ensina, e da *avaliação* a que o aluno é submetido.

Pretendemos terminar esta dissertação tentando reflectir um pouco sobre os factores que mais influenciam a educação científica, procurando tirar partido da investigação efectuada em termos práticos, isto é, tendo em vista a melhoria da aprendizagem da Física, afinal o maior objectivo deste trabalho e de todos os trabalhos similares.

5.6.1 O curriculum

Mais importante do que o *curriculum formal*, emanado do Ministério da Educação, é o *curriculum prático*, pois este corresponde ao conteúdo de ensino, não como foi idealizado, mas como foi levado à prática.

É claro que a qualidade deste *curriculum prático* depende da qualidade do *curriculum formal*, mas também depende de diversos factores que não têm sido convenientemente valorizados pelos agentes envolvidos no acto educativo.

Tendo em conta a importância que, no *currículum prático*, têm os *programas* e os recursos educativos, que incluem, como elemento fundamental, os *manuals escolares*, vamos ver como melhorar uns e outros.

Um dos resultados da investigação que efectuámos foi a confirmação de que na aprendizagem de cada aluno interfere o pensamento, sentimentos, emoções, paixões e actividade do aluno. Isto tem de ser forçosamente tido em conta pelos autores dos programas e dos *manuals escolares* que devem sugerir estratégias que desenvolvam no aluno predisposição psicológica para aprender, os tornem aliciantes para ele, e, se possível o apaixonem pelo assunto a aprender. É fundamental o desenvolvimento de *atitudes construtivas*, a comunicação de *valores formativos* a par da transmissão de *conhecimentos*. É que só assim se garante uma maior *competência cognitiva* e uma maior facilidade em ultrapassar os bloqueios de ordem conceptual.

As diversas componentes do *currículum prático*, particularmente os programas e os materiais educativos, incluindo os livros e protocolos experimentais usados, nem sempre são coerentes entre si do ponto de vista da Filosofia da Ciência. Muitas vezes, o programa tem, por exemplo, subjacente uma visão construtivista do conhecimento científico, mas o livro adoptado tem uma visão positivista e operacionalista, em flagrante contraste com o programa. É importante que todas as componentes do *currículum* assentem numa reflexão filosófica actual acerca do conhecimento científico, o que se torna patente no modo como são encaradas questões que directa ou indirectamente vão surgindo, tais como:

- O que se estuda na Física?
- Qual é o objectivo da Física?
- Qual é a fonte do conhecimento físico?
- Qual é a metodologia da Física?

- Qual é a relação da Física com outras áreas do conhecimento e com a Sociedade?
- Qual é a função da actividade experimental em Física?
- Que papel cabe ao professor no ensino moderno da Física?
- O conhecimento físico é descoberto ou construído?
- Qual é o papel da criatividade na construção do conhecimento? E da intuição? E dos modelos?
- Etc., etc.

A história mostra-nos que a *operacionalização das grandezas* se revelou fundamental para permitir a transição de uma fase de observação qualitativa dos objectos/fenómenos para uma fase de conceptualização activa. Essa operacionalização também é importante no ensino da Física, pois ajuda a concretizar a definição de algumas grandezas. Porém, não se deve confundir essa operacionalização com a adopção de uma filosofia operacionalista, de cariz neopositivista, com desprezo pela compreensão física, qualitativa, dos conceitos físicos e pelo carácter construtivista do conhecimento, pela problematização permanente inerente ao conhecimento e pelo carácter dialéctico da construção do conhecimento. Os aspectos quantitativo e qualitativo dos fenómenos têm de ser tratados simultaneamente. Há que dar relevância à génese dos conceitos e à sua integração com os corpos. Conceitos como espaço, tempo, comprimento, etc. não têm qualquer significado no abstracto. Têm, pois, de ser associados aos corpos materiais.

O *currículo* deve considerar a *actividade experimental* com interesse prioritário a todos os níveis, mas principalmente nos níveis etários mais baixos, quando os alunos têm ainda dificuldade em raciocinar no abstracto, isto é, sem apoio no

manuseamento de objectos concretos. Porém, a actividade experimental tem de ser encarada numa perspectiva epistemologicamente correcta.

E o que é uma perspectiva epistemologicamente correcta para a actividade experimental?

Por coerência com tudo o que afirmámos até ao momento, diremos que é a perspectiva que não crie nos alunos a ilusão de que há um método científico, linear, estereotipado de «descobrir a Ciência». É também aquela que tem em conta que se raciocina com base em conceitos e não em dados que constituem evidências gratuitas. É, finalmente, a perspectiva que considera a actividade experimental:

- essencialmente uma actividade de investigação que anda associada à teorização para a descoberta do conhecimento;
- uma actividade guiada por paradigmas teóricos;
- uma boa forma de tratar problemas científicos, estimulando a criatividade na construção das hipóteses e testando hipóteses de trabalho;
- acima de tudo, uma forma excelente de proporcionar a confrontação entre os modelos alternativos dos alunos e as informações provenientes do mundo exterior, proporcionando, assim, uma interacção dialéctica entre o sujeito e o objecto do conhecimento.

Nos anos 60/70 surgiram diversos projectos (conhecidos por «projectos do alfabeto») que faziam a apologia da chamada «aprendizagem por descoberta». Sabemos hoje que esses projectos continham graves erros na orientação dada à actividade experimental, e nas concepções sobre a natureza da Ciência que lhe estavam subjacentes (Gil et al. 1991, p.34). Não tinham em conta, particularmente, os aspectos acabados de focar. Tais projectos tiveram muito valor, foram mesmo revolucionários em muitos aspectos. Hoje, porém, servirão de bons exemplos de como não deve ser encarada a actividade experimental.

Os programas e os manuais de ensino devem procurar incutir nos seus utilizadores uma visão construtivista e dialéctica (em vez de uma visão empírico-indutivista e positivista) do conhecimento científico, e o modo como encaram a actividade experimental é um bom pretexto para isso. Também deverão, para respeitar a natureza dialéctica da Ciência, desenvolver os conhecimentos *em espiral* (e não linearmente), conforme preconiza a UNESCO já há alguns anos (Claramonte, 1972, p. 72).

Há uma tendência para os *programas* se basearem em modelos rígidos, no que se refere à estrutura da Ciência e à relação com a Sociedade. Há programas que se baseiam num modelo dito *realista*, que partem de problemas do dia a dia, sacrificando, muitas vezes, a estrutura e ordem lógica dos conhecimentos. Há outros programas, baseados num modelo chamado *teorista*, que se agarram estritamente à lógica dos conhecimentos, sacrificando por demais a relação com o mundo real. Há que respeitar o facto de a aprendizagem da Física ser uma construção lógica, em que os conceitos não podem ser abordados ao sabor das circunstâncias. Isso não significa que também se encare a aprendizagem apenas como uma construção lógica. Não se deve deixar escapar qualquer oportunidade de mostrar a importância da Física na vida diária.

O programa de Física deve, portanto, ser encarado de modo a conseguir-se um equilíbrio entre essas duas visões extremistas, a *realista* e a *teorista*.

O *currículo* deve dar grande importância à *resolução de problemas*. Estes devem ser considerados não como actividades mecanizadas de rotina, para «aplicação de conhecimentos», mas como meios privilegiados de aprendizagem e de desenvolvimento cognitivo (secção 4.4). A perspectiva com que é vista a resolução de problemas não deve assentar no velho paradigma da transmissão/recepção de conhecimentos já elaborados mas, sim, no paradigma actual da construção pessoal do conhecimento. Deve-se insistir na análise e descrição do enunciado do problema, na exploração de vias possíveis de resolução, na discussão dos resultados e da resolução escolhida (Valadares e Pereira, 1991, Vol. 1, pp. 191 a 210).

A utilização das *novas tecnologias de ensino*, como é o caso dos computadores, deve ser estimulada pelos programas. O *currículum* deve tirar partido de todas as potencialidades do movimento informático e acabar, de vez, com as tecnofobias. Para além do entusiasmo que o computador gera nos professores e nos alunos, para se ajudarem entre si e contribuírem para a valorização do processo ensino-aprendizagem, sabemos hoje que essa máquina, quando bem utilizada, constitui uma poderosa ferramenta de aprendizagem.

Com efeito, a investigação tem mostrado bem a importância da actividade de confrontação dos modelos alternativos que os alunos possuem com a experiência. Por vezes só é possível ou só é prático simular a experiência, e para isso dispomos do computador.

Há hoje *programas de simulação* computacional de excepcional qualidade. Por meio deles e, principalmente, através de programas altamente interactivos ditos *de modelação*, conseguem-se criar *micromundos de aprendizagem* que muito contribuem para facilitar esta.

Para além disso, há toda uma actividade científica que, com o computador, o aluno pode desenvolver por si, o que tem um alto valor formativo. Estamos a pensar na aquisição e processamento de dados em tempo real, com o recurso a sensores, e na transformação de dados previamente adquiridos por meio de folhas de cálculo. Finalmente, o computador, como processador de texto, tem enormes vantagens sobre as velhas máquinas de escrever. (4)

A chamada tecnociência contribuirá para a melhoria da escola se não for imposta de modo desgarrado da Ciência e à revelia da natureza desta. Só assim contribuirá para o desenvolvimento integral dos alunos, que inclui o seu desenvolvimento humanístico. O computador não melhorará a aprendizagem se for imposto de qualquer maneira às escolas. Trata-se de uma ferramenta poderosa, sem dúvida, mas que só melhorará a aprendizagem de carácter formativo se respeitar os conhecimentos decorrentes da investigação no campo da utilização dos computadores na educação e no campo das didácticas específicas (onde são particularmente importantes os conhecimentos sobre concepções alternativas).

Os objectivos e as estratégias para ensinar as noções físicas deveriam ter em conta o desenvolvimento cognitivo dos aprendizes e os diversos níveis de cultura científica:

- o nível de literacia científica e de cultura mínima para o cidadão comum;
- o nível de cultura essencial para o prosseguimento de estudos científico-tecnológicos no ensino secundário;
- o nível de cultura para a inserção na vida activa após o ensino secundário;
- o nível de cultura para continuação de estudos científico-tecnológicos na Universidade.

Infelizmente é difícil ter em linha de conta todos estes níveis pois, quando o aluno frequenta o ensino secundário, por exemplo, não há possibilidade de saber *a priori* se ele irá ou não prosseguir estudos universitários relacionados com a Física.

Devia haver, em paralelo, mais do que um *curriculum* e a possibilidade de transferência de alunos de uns para outros. Mas isso cria dificuldades logísticas difíceis de ultrapassar.

Os juízos cognitivos e de valor educacional que atrás formulámos mostram como é importante criar *ambientes de aprendizagem abertos e flexíveis*. Deve-se começar por uma familiarização com algumas noções físicas integradas num conhecimento geral do mundo, mediante o recurso a estratégias tanto quanto possível experimentais e fenomenológicas. É importante que a linguagem científica, naturalmente pobre e incorrecta, vá sendo corrigida sempre, de modo a que o discurso do aprendiz se vá aproximando, cada vez mais, do que corresponde ao uso correcto dos conceitos.

Os *programas de ensino* devem *fomentar a iniciativa, a autonomia e a criatividade dos alunos*, particularmente em níveis etários mais elevados. Nessa ordem de ideias, os programas deverão contemplar áreas opcionais para investigação feita de modo bastante livre pelos próprios alunos, em temas para os quais eles se sintam motivados como Electrónica, Astrofísica ou Teoria da Relatividade Restrita.

Se o paradigma em que se enquadra o processo ensino-aprendizagem mudou, é hoje um paradigma cognitivista e construtivista que dá grande importância à metaprendizagem, há que mudar as estratégias e os instrumentos do processo. A utilização de novas ferramentas intelectuais para o ensino e aprendizagem que se preocupam com a estruturação das ideias na mente dos alunos e com a metacognição, como é o caso dos mapas conceptuais e dos vês de Gowin, tem de ser estimulada. Falaremos destas ferramentas na secção dedicada aos professores.

O *curriculum prático* deve apontar *recursos e estratégias* que tenham em linha de conta as concepções alternativas que os alunos possuem, e propiciem o conflito entre essas concepções e resultados experimentais.

Um bom e moderno recurso, que deve ser estimulado, é a visita de estudo, previamente preparada, a um *museu de ciência interactivo*. O aluno executa, ele próprio, as experiências que lhe são propostas e confronta as suas previsões com os resultados.

Um relatório consequente da visita, ou o preenchimento de um questionário previamente elaborado pelo professor com base nas experiências que o aluno pode efectuar durante a visita, em que o aluno tenha que descrever e interpretar o que observou, propiciará uma boa análise do desempenho do aluno e uma discussão conceptual frutuosa com ele. Será uma boa oportunidade para propiciar o chamado conflito conceptual, que pessoalmente consideramos importante para a mudança conceptual.

Os *programas de ensino* devem ser equilibrados em *extensão* e em *nível de dificuldade* e estarem bem enquadrados nos outros programas, da mesma e de outras disciplinas.

Não compreendemos como ainda há discrepâncias e falta de coordenação quer horizontal quer vertical entre as diversas disciplinas e dentro da mesma disciplina, que vão ao ponto de se traduzir por diversas concepções do ensino em programas da mesma disciplina e do mesmo ano! (5)

Achamos perfeitamente possível que o professor de Física introduza conceitos matemáticos pela via genética, servindo-se dos fenómenos físicos, como, por exemplo, o conceito de taxa de variação a propósito da velocidade dos corpos ou o de integral a propósito do cálculo de um trabalho de uma força, mas, se tal suceder, a disciplina de Matemática terá de apoiar essa introdução, operando logo a seguir com esses conceitos, e não um ou dois anos depois como sucede em vários casos.

Quer a Física quer a Matemática fundamentam-se em grandes princípios com um significado epistemológico tão semelhante que **Kant** viu, em ambos, o mesmo tipo de afirmações - *juízos sintéticos a priori*, e **Poincaré**, por sua vez, viu nessas afirmações autênticas *convenções*, cuja escolha é guiada por factos experimentais.

A diferença entre Física e Matemática envolve a experiência, já que a evidência empírica da Física é feita com base em objectos da própria Física, tais como bolas, chapas, réguas, cronómetros, multímetros, etc., enquanto que a Matemática dispensa a evidência empírica, guiando-se exclusivamente por critérios de coerência, ou, se isto não é verdade (conforme alguns pensadores crêem), essa evidência empírica envolve objectos também físicos e não matemáticos.

Ainda assim, a Matemática e a Física tiveram histórias próximas, e hoje não se concebe a segunda sem a primeira. Não compreendemos, pois, o divórcio que tem havido entre a Física e a Matemática nos programas do ensino básico e secundário.

Querendo que a Escola de hoje estimule o mais possível essa colaboração entre a Matemática e a Física e pretendendo que o ensino da primeira preste um bom serviço ao ensino da segunda, recomendam-se algumas medidas que aqui listamos de forma necessariamente breve:

- Recorrer o mais possível a situações físicas, incluindo no tratamento formal da Matemática grandezas e unidades físicas bem como notações muito usadas em Física (fugir muitas vezes ao y e ao x).
- Insistir mais e, se possível, mais cedo:
 - nas transformações de unidades;
 - nas expressões numéricas;
 - nas proporcionalidades;
 - nas operações com potências, principalmente potências de 10;
 - nas equações numéricas e literais, resolvendo estas em ordem a diferentes variáveis;
 - no estudo de funções;
 - nas operações com vectores;
 - na trigonometria em situações práticas;
 - no cálculo de derivadas associado a situações físicas.
- Incentivar os alunos a desenvolver o poder crítico e de análise dos cálculos que efectuem.
- Utilizar as potencialidades da resolução de problemas, sem prejuízo do poder de cálculo.

Uma outra grande crítica que fazemos ao *curriculum formal* que hoje existe é o facto de ele incluir uma falsa disciplina de *Ciências da Natureza*.

Com efeito, ao analisarmos o respectivo programa, concluímos que se trata de uma disciplina de Ciências Naturais e não de uma autêntica disciplina de Ciências da Natureza. O seu programa não vai além de uma introdução ao estudo da Biologia e da Geologia. É toda uma componente importante do conhecimento que fica esquecida, a componente das ciências físicas, sendo certo que a Física até significa etimologicamente Natureza.

Onde estão os alicerces do quadro conceptual sobre os quais se estrutura todo o conhecimento do mundo físico? Na disciplina actual de «Ciências da Natureza» estuda-se a atmosfera e a água, mas poucas ou nenhuma experiência de aprendizagem são efectuadas com ela, não se vivem as sensações da pressão atmosférica, ou da impulsão de Arquimedes, não se utiliza a energia dos ventos, nem a energia do caudal de água, não se mede a radioactividade que pode contaminar a atmosfera, não se abordam as consequências físicas da radiação solar que nela incide, não se estuda experimentalmente o efeito de estufa e as suas implicações no clima, a circulação global de ar na atmosfera e as suas consequências meteorológicas, etc. É toda uma série de fenómenos físicos que poderiam entusiasmar e motivar os alunos que ficam por tratar. É toda uma série de subsunções fundamentais para futuras aprendizagens da Física que ficam por aprender.

Fala-se certamente nos animais, em pequenos e grandes ecossistemas, mas não se fala nas condições físicas em que vivem. Não se referem, por exemplo, as correntes de convecção térmica que não só explicam os movimentos das massas de ar atmosférico como fazem com que pequenos animais como camarões andem numa roda viva sobre as pedras aquáticas pouco profundas aquecidas pelos raios solares, tal como se brincassem numa invisível roda de feira popular.

A falta de uma disciplina **autêntica** de Ciências da Natureza, com professores preparados para a ensinar, é um dos maiores pontos fracos do nosso *curriculum formal* no que se refere à parte científica.

É urgente criar condições para que essa disciplina possa ser ensinada em toda a sua abrangência. Mas há duas experiências negativas que nos obrigam a ser cautelosos. Uma delas é a má experiência de ensino da disciplina de Ciências físico-naturais, nos velhos cursos técnicos. Outra é a experiência de introdução da actual disciplina de «Ciências da Natureza» que começou por ter um bom programa, o qual foi alterado porque a grande maioria dos respectivos professores, que eram de formação em Biologia e Geologia, sacrificavam sistematicamente a parte de Física e Química.

Finalmente, vamos referir um aspecto que também é muitas vezes descurado. Vimos durante esta investigação a *importância de definir com clareza os quadros conceptuais* em que nos situamos ao encarar a ciência física. Não é o mesmo o estudo de um fenómeno de movimento com base na Mecânica Clássica ou na Teoria da Relatividade Restrita.

Vejamos, a título de exemplo, a expressão $F = m \frac{dv}{dt}$.

Vamos supor que nos situamos no quadro conceptual da *Mecânica newtoniana*. A expressão é válida apenas num sistema de coordenadas inerciais, e não se o sistema for acelerado. Além disso, ela é apenas aplicável a partículas de massa constante e muito superior à das partículas elementares, propagando-se a velocidades muito inferiores à da luz, longe de corpos de grandes massas, como buracos negros.

No caso de a massa ser muito próxima da massa das partículas elementares, teremos de mudar de domínio conceptual, passando para o da *Mecânica Quântica*, com um estudo completamente diferente.

Se a velocidade for próxima da da luz, há necessidade de recorrer ao quadro conceptual da *Teoria da Relatividade Restrita*, com um estudo necessariamente diferente.

Na hipótese de haver corpos próximos de grande massa, teremos de passar ao domínio da *Teoria da Relatividade Geral*, com um estudo ainda diferente.

Quer o *currículum* quer os professores devem respeitar este aspecto acabado de focar.

5.6.2 O professor de Física

Passemos agora ao professor de Física, que é fundamental e insubstituível no seu papel de inspirador e facilitador da aprendizagem dos alunos, desenvolvendo a criatividade deles através da realização de actividades adequadas e , tanto quanto possível, inovadoras. Para isso, é importante que ele possua, em primeiro lugar, uma boa formação científica, devendo esta ser acompanhada de uma boa preparação pedagógica. Só assim poderá contribuir para a criação de um ambiente adequado à aprendizagem nas aulas. Concordamos com Tobin e Espinet quando afirmam que “*uma falta de conhecimentos científicos seguros constitui a principal dificuldade para que o professor se aplique em actividades inovadoras*” (1989). O ambiente da sala de aula tem de ser propício à construção da aprendizagem por parte do aluno, pelo que tem de ser dialogante, interrogativo, problematizante, disciplinado e de entre-ajuda.

1. Como deve proceder o professor?

À luz do paradigma construtivista que tentámos caracterizar neste trabalho e face ao estudo das concepções alternativas que efectuámos, vamos discriminar, de modo necessariamente sucinto, alguns procedimentos do professor que consideramos úteis para a rentabilização do seu ensino:

- Deve actuar de modo a facilitar ao máximo a mudança conceptual do aluno. Para isso, deve conhecer bem os principais motivos da dificuldade da mudança conceptual, já exaustivamente referidos neste trabalho, e que aqui relembramos muito resumidamente:
 - bloqueios de ordem epistemológica, psicológica e sociológica;
 - as características, ideias e atitudes dos alunos;
 - o facto de muitas das concepções alternativas terem sido apreendidas significativamente;
 - a indefinição do referencial conceptual em que se situa a aprendizagem.
- Deve sempre partir do conhecimento prévio do aluno, tendo em conta, particularmente, as concepções alternativas dos alunos. Deve adoptar estratégias e materiais de ensino que ataquem, nos seus pontos fracos, os sistemas conceptuais alternativos. Para isso, deve:
 - conhecer os trabalhos de investigação sobre concepções alternativas;
 - procurar libertar-se das suas próprias concepções alternativas;
 - propiciar muita actividade de confrontação das ideias dos alunos com os dados da observação e da experimentação;
 - corrigir permanentemente a linguagem dos alunos;
 - avaliar permanentemente e correctamente os significados dos alunos (concepções pessoais) sobre o conteúdo programado, estimulando e mentalizando-os para que deixem transparecer essas concepções com toda a clareza e honestidade;

- adoptar outras estratégias de ensino das concepções científicas, caso verifique que nos alunos não ocorreu a mudança conceptual pretendida;
 - propiciar actividades em que os alunos apliquem as novas ideias que assimilaram nas situações problemáticas (transferência da aprendizagem).
- Deve utilizar uma linguagem clara, cientificamente correcta e com parcimónia, respeitando escrupulosamente o significado correcto dos conceitos. A aprendizagem de uma determinada ciência é também, em grande parte, uma familiarização com uma linguagem própria, tantas vezes em conflito de significado com a linguagem do dia a dia. Não se aprende bem uma língua com quem a fala mal. Ora, as implicações negativas dos erros de linguagem na aprendizagem da Física são, quanto a nós, maiores ainda do que na aprendizagem de uma língua viva.
 - Deve intervir activa e construtivamente para tirar partido das deficiências conceptuais e metodológicas dos alunos em benefício deles próprios, de um modo natural, sem suscitar a desconfiança e, em consequência, sem uma atitude de receio por parte deles. De acordo com a natureza da Ciência, é normal que surjam erros num processo de aprendizagem (Fisher e Lipson, 1986, p. 788) e esses erros ajudam até a revelar a existência de ideias incorrectas no aluno, cujo conhecimento é decisivo para que o professor o possa ajudar.
 - Deve falar de modo claro, adoptando um tempo de espera entre afirmações na exposição e nos diálogos («*waiting-time*») adequado (nem demasiado curto nem demasiado longo) para permitir uma boa comunicação com os alunos.
 - Deve fomentar boas relações interpessoais na sala de aula. Para isso, terá de estar atento quer à estrutura formal do grupo-turma quer à sua estrutura informal (muitos problemas que surgem na sala de aula têm que ver com o que se passou fora dela).

- Deve adequar o seu ensino à turma e às condições de que dispõe. Para isso, tem de avaliar muito bem o contexto em que o ensino decorre, tirar o máximo partido dos aspectos positivos e procurar atenuar os aspectos negativos. Tal como afirmam Evertson et al. (1980), “*o bom ensino depende de aspectos contextuais.*” O ensino presencial tem uma natureza complexa, com imensos factores circunstanciais que o influenciam.
- Deve procurar individualizar o mais que puder o ensino, adequando as estratégias aos conhecimentos e capacidades de cada aluno, tendo em conta que a aprendizagem é um processo idiossincrásico: depende bastante das características de cada aluno e do seu desenvolvimento intelectual. Isso não significa que deixe de recorrer também ao discurso comum e ao trabalho em grupo-turma, mas deverá intercalar essa actividade com diálogos frequentes com cada aluno.
- Deve facilitar o mais possível a aprendizagem significativa das ideias cientificamente correctas da Física, no fundo a diferenciação e a reconciliação integradora correcta dos conceitos na estrutura cognitiva de cada aluno. Para tal tem de saber que:
 - há uma hierarquia no modo como assimilamos os conceitos (esquema da página 552), e que os novos conceitos têm de ser ancorados aos subsunçores (também chamados conceitos integradores) previamente existentes;
 - têm de existir conceitos subsunçores seguros para que ocorra a relação simples entre os conceitos previamente existentes e os novos conceitos;
 - o conteúdo a apreender tem de ser potencialmente significativo para o aluno, o que obriga a que:

(i) as ideias sejam correctas, lúcidas, plausíveis, não arbitrárias;

(ii) as ideias subordinadas elaborem as ideias principais;

(iii) sejam permanentemente estabelecidas ligações significativas entre as ideias subordinadas e as ideias principais;

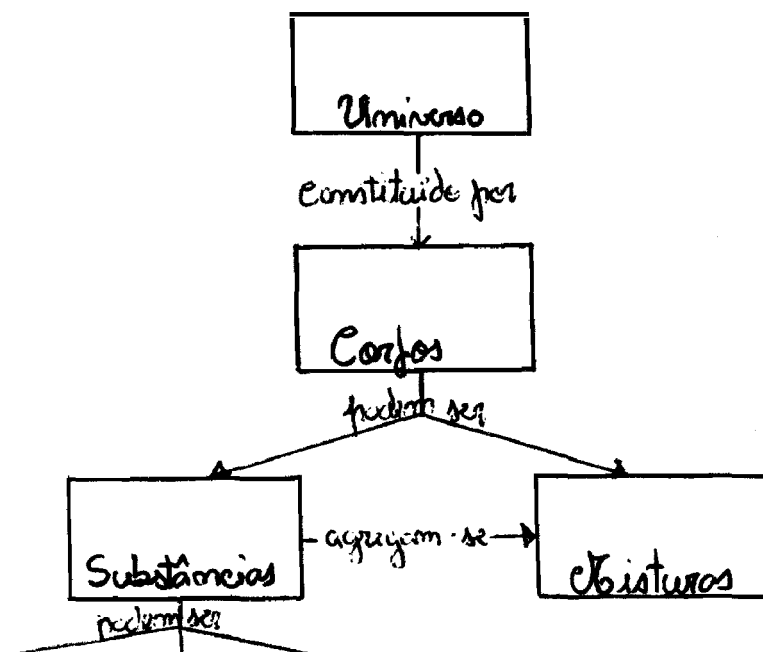
(iv) os destaques apontem para o conceito principal a discutir;

(v) existam subsunções adequados na estrutura cognitiva do aluno;

- Deve motivar o aluno para que se predisponha psicologicamente e actue intencionalmente no sentido de captar o significado do material educativo relacionando, de modo substantivo e não arbitrário, o novo material, potencialmente significativo, com a sua estrutura cognitiva.
- Finalmente, num processo de ensino-aprendizagem que se pretende actual (e que inclui a avaliação como componente fundamental do processo), o professor deve basear todas as suas estratégias num paradigma cognitivista, pelo que as ferramentas utilizadas terão de se enquadrar nesse paradigma.

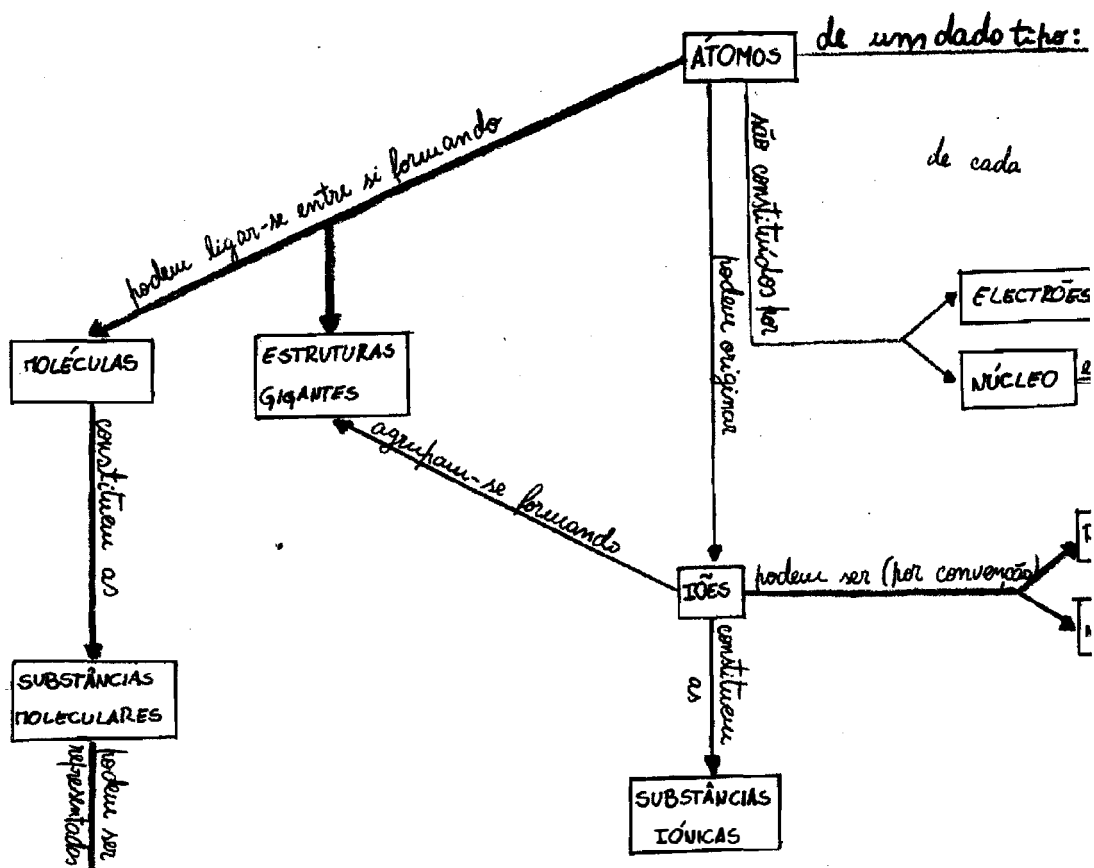
Um bom recurso educativo é o uso de mapas conceptuais, porque permite desvendar os «segredos» da mente do aluno, as suas dificuldades conceptuais, conforme ilustramos nas figuras seguintes, onde destacamos partes significativas de mapas conceptuais construídos por alunos de uma turma do 8º ano de escolaridade.

Mapa conceptual

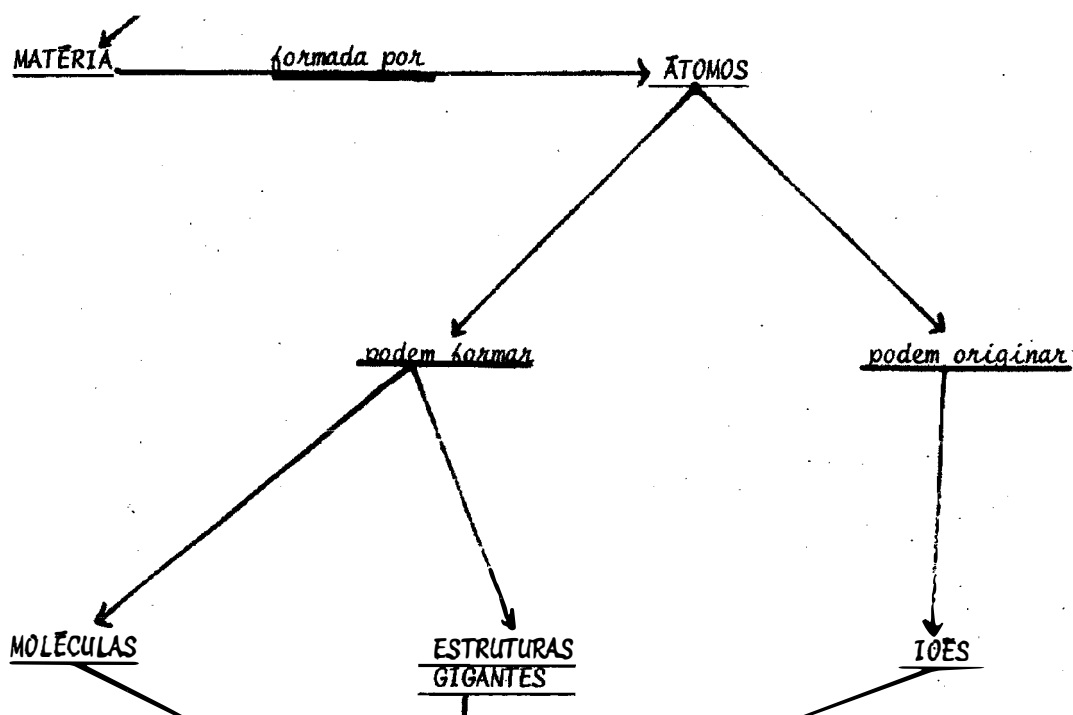


Esta parte do mapa conceptual deixa facilmente antever que o aluno ainda não construiu correctamente os conceitos de corpo (agregado de partículas) e substância (tipo de partículas). A indequação das palavras de ligação entre esses dois conceitos mostra que ele ainda não discrimina bem entre o corpo e a substância, aquilo que constitui o corpo.

O mapa conceptual de que a seguir reproduzimos uma parte alertou-nos para a possibilidade de o aluno pensar que as moléculas não formam estruturas gigantes cristalinas. Interrogado acerca disso, a seguir à construção do mapa, confirmou que possuía, de facto, a ideia incorrecta de que os corpos moleculares não podem ser sólidos cristalinos.



Mas não era apenas esse aluno, conforme mostra a seguinte porção de outro mapa:



Também este aluno não estabeleceu qualquer ligação entre os conceitos de molécula e estrutura gigante, e, pior ainda, entre os conceitos de ião e estrutura gigante, desconhecendo que há cristais iónicos e moleculares. Tinha visto e estudado o cloreto de sódio, mas desconhecia que os cristais que tinha visto são estruturas gigantes iónicas. Também desconhecia que um pedaço de gelo é uma estrutura gigante molecular.

Estes são apenas alguns pequenos exemplos da utilidade do uso dos mapas conceptuais.

2. O que deve o professor evitar?

Em contra-ponto, vamos agora indicar o que o professor deve, a todo o custo, evitar, para não prejudicar o seu ensino :

- Evitar a adopção de estratégias que reforcem a tendência que muitos alunos têm para aprender os novos conteúdos de modo não substantivo, verbalista e mecânico, decorando fórmulas e algoritmos sem compreensão do significado físico das grandezas intervenientes.
- Evitar insistir nas questões de rotina e evitar, também, limitar-se a analisar as soluções das questões dos alunos sem se preocupar com as respectivas resoluções.
- Evitar avançar respostas prematuramente sem se preocupar em conhecer as respostas completas dos alunos e as possíveis falhas nos seus raciocínios.
- Evitar o uso de linguagem infantilizante e de modelos demasiado simplistas, porque não estimulam o desenvolvimento intelectual do aluno: não respeitam a teoria da área de desenvolvimento potencial de Vygotski a que nos referimos e são muitas vezes reforçadores das concepções alternativas que ele possui.

- Evitar termos ambíguos, supérfluos e incorrectos, bem como designações diferentes para o mesmo conceito. Evitar, por exemplo, a proliferação de nomes de pretensas leis independentes, que induzem no aluno a ideia de que são esquemas conceptuais distintos, quando, na realidade, não o são, e que faz com que eles fiquem com uma visão desintegrada da Física. Alguns exemplos:
 - porquê afirmar que a expressão $I = \Delta p$ traduz a lei da variação do momento linear, se é um facto que ela se enquadra na 2ª lei de Newton, é perfeitamente equivalente à que traduz a segunda lei?
 - porquê falar em energia potencial de um ponto material, se a energia potencial é uma energia associada a interacções?
 - porquê usar ainda a designação de «calor latente» se ela reforça a concepção alternativa de que o calor existe nos corpos?
- Evitar actuar segundo concepções ultrapassadas acerca da natureza da Ciência, como a de que existe um método linear e estereotipado de construir o conhecimento científico - erro em que se caiu há alguns anos atrás quando tanto se falava num método científico - o OHERIC (Observação-Hipótese-Experimentação- etc.), e se fazia crer aos alunos que ele é «a pedra filosofal» para a construção da Ciência.
- Evitar as estratégias baseadas na concepção clássica, incoerentes com a visão actual da Filosofia da Ciência e da Psicologia da Educação, da chamada «aprendizagem por descoberta», entendida como uma indução das ideias científicas a partir de dados sensoriais neutros e gratuitos, isto é, sem uma mediatização da mente humana no acto de recolha de dados.

Vamos, e para acabar esta secção dedicada ao professor, referir-nos muito sumariamente à sua formação.

Há conhecimentos que a formação de um professor lhe deve proporcionar de modo seguro. Referimos os que consideramos mais importantes, sem qualquer preocupação de ordem:

- Conhecimento seguro da matéria a ensinar, quer numa perspectiva teórica quer numa perspectiva experimental.
- Conhecimento da história da evolução das ideias acerca do mundo físico, incluindo os desenvolvimentos científicos recentes.
- Conhecimento das interações entre a Ciência, a Tecnologia e a Sociedade.
- Conhecimento actualizado de Epistemologia.
- Conhecimento da Psicologia da Educação na perspectiva mais actual, incluindo a Psicologia da relação interpessoal professor-aluno.
- Conhecimento sobre a avaliação educativa, fundamentado na visão actual da Filosofia da Ciência.
- Conhecimento actualizado sobre «problem solving».
- Conhecimento das concepções alternativas no ensino, das suas características e origens.

5.6.3 A avaliação educativa

Os juízos acerca do processo ensino-aprendizagem que formulámos não poderão deixar de ter implicações na avaliação, como componente fundamental que é desse processo. É sobre essas implicações que iremos aqui tratar sumariamente, analisando-as numa perspectiva de comparação com a avaliação tradicional.

Sabemos que qualquer corpo de conhecimentos só será apreendido significativamente por um aluno se for incorporado, de modo substantivo, na sua estrutura cognitiva. Além disso, para que essa apreensão seja correcta, os conceitos devem estar interligados de modo cientificamente correcto na referida estrutura.

Tendo então em conta a importância da estrutura cognitiva de cada aluno na sua aprendizagem, isto é, o modo como os conceitos estão enquadrados na sua mente, há que «penetrar nos segredos» dela. Isso só se consegue com uma avaliação formativa correcta. Deste modo, devemos privilegiar os instrumentos de avaliação que permitem detectar as deficiências das concepções que os alunos possuem na sua mente.

No que se refere aos testes, o professor deve insistir mais nas questões dirigidas ao significado físico dos conceitos, ao modo como estes estão dominados, ao modo como são manipulados, e menos nos velhos pseudo-problemas, que não são mais do que questões rotineiras de índole quantitativa que apenas mecanizam o uso de fórmulas e algoritmos.

Quando um aluno domina o significado correcto de um conceito, ele é capaz de o relacionar correctamente com outros conceitos. Para testar a compreensão de um conceito, o professor pode, por exemplo:

- pedir ao aluno que escreva frases correctas com ele;
- pedir ao aluno que construa um mapa conceptual com esse e outros conceitos, depois de o introduzir na técnica de construção de mapas conceptuais;
- escrever ele próprio afirmações, envolvendo o conceito a avaliar, umas correctas e outras incorrectas, e pedir ao aluno que identifique quais as afirmações correctas e corrija as afirmações incorrectas;

- fornecer ao aluno afirmações sem significado usando o conceito físico a avaliar e pedir-lhe para criticar as afirmações (Peters, 1982, p. 507).

É importante que os alunos utilizem os conceitos físicos em situações experimentais. E porquê? Porque, conforme vimos, a investigação em concepções alternativas tem mostrado que os alunos por vezes têm grande sucesso na resolução de testes, envolvendo determinados conceitos, mas falham na utilização desses mesmos conceitos ao interpretarem situações práticas.

Numa perspectiva cognitivista, é fundamental avaliar continuamente os alunos, através do diálogo, de pequenos questionários, de mapas conceptuais, de «vês» epistemológicos, de testes mais frequentes. A avaliação não pode ser, como sucedia tradicionalmente, um processo episódico, destinado a fins pouco mais do que administrativos. Os momentos de avaliação são momentos privilegiados de que o professor e o aluno dispõem para melhorar o ensino e a aprendizagem. Há que tirar o máximo partido deles.

O professor deve ter sempre presente que, para cada finalidade, há o seu tipo de avaliação. Avaliar para os alunos aprenderem melhor é muito diferente do que avaliar para seleccionar alunos.

Os instrumentos de avaliação e o modo como são aplicados têm de ser muito diferentes. Um mapa conceptual é um bom instrumento para a primeira daquelas finalidades. É certamente um mau instrumento para a segunda finalidade.

Grande parte da confusão dos alunos e professores acerca da avaliação reside na não consideração de que cada tipo de avaliação requer os seus instrumentos próprios, todos têm vantagens e todos têm inconvenientes. A justificação é simples. A avaliação, ao contrário da medição, exige que sejam formulados juízos de valor para determinada finalidade. Esses juízos de valor não têm uma validade universal, mas sim contextual. Devem ser considerados válidos apenas nas circunstâncias em que decorreu o processo e para a finalidade que presidiu à avaliação.

Em avaliação, os juízos de valor são eminentemente subjectivos e, por paradoxal que pareça, são-no tanto mais quanto mais correcta for a avaliação do ponto de vista cognitivista e formativo. Procurando ser mais claro, diremos que quanto mais procuramos matematizar a avaliação, menos ela cumpre a sua função formativa e valoritativa da aprendizagem.

5.6.4 A governança

Governança é o título do 6º e penúltimo capítulo do livro «*Educating*» de D.Bob Gowin (1990. pp. 153 a 194). Muitas pessoas deviam ler esse capítulo, particularmente aquelas que, pela sua actividade ou estatuto, mais contribuem para a influência social na educação. A educação é influenciada por factores académicos, mas todos temos consciência de que estes, por sua vez, são influenciados por factores sociais.

Assim, quando os pais de uma criança se demitem da sua função de educadores, não se preocupam se a vida escolar dos filhos corre bem ou mal, estão a interferir de modo extraordinário na aprendizagem dos filhos.

Quando um governo resolve alterar a fatia do orçamento de estado para a educação, está a interferir enormemente nela.

Quando o Ministério envia uns pontos de exame para as escolas, está a interferir na educação em termos presentes e futuros.

Quando, como consequência das eleições numa escola, o novo conselho directivo tem ideias diferentes acerca da autoridade na escola, a educação nessa escola muda.

Quando uma universidade resolve alterar um curso com um ramo educacional, está a interferir, em termos presentes na educação universitária, e em termos futuros na educação secundária.

Quando o Conselho Pedagógico de uma escola convence um professor a não ir a uma importante acção de formação para não faltar às aulas, está a interferir na educação.

O desenvolvimento dum tema tão vasto e complexo como este, da *governança*, não cabe no âmbito deste já longo trabalho. Por isso limitamo-nos, para dar como terminada esta dissertação, a destacar cinco aspectos que consideramos absolutamente vitais para a melhoria da educação,

- a valorização do papel da célula familiar na educação,
- a melhoria da formação e qualificação dos professores, acompanhada da dignificação da respectiva carreira,
- a criação de melhores condições materiais de trabalho nas escolas,
- um maior apoio à investigação em educação,
- uma reforma curricular dinâmica, projectando permanentemente os resultados da investigação em educação e incentivando o uso de práticas educativas mais activas, associativas e interdisciplinares, bem como uma maior abertura da escola ao meio social,

e a afirmar que em educação, e no que respeita à *governança*, há dois factores decisivos: dinheiro e tempo. Torna-se necessário aplicar dinheiro e aguardar algum tempo pelos resultados... o que infelizmente não é aliciante para os governos por razões óbvias.

NOTAS

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

(1) Já Piaget, no seu livro *Psicologia e Epistemologia*, escrevia o seguinte: "*Ora, sob a influência convergente de uma série de factores, considera-se hoje, cada vez mais, o conhecimento mais como um processo do que como um facto.*" (1976, p. 13). E, para fundamentar esse facto, refere vários trabalhos histórico-críticos e epistemológicos, entre os quais o do neo-kantiano P. Naport, e a conhecida e lapidar obra de T. **Kuhn**, «*The Structure of the Scientific Revolutions*» (1970).

No Capítulo 3, ter-se-á oportunidade de aprofundar este ponto de vista.

(2) O conhecimento, como processo de organização das ideias com base nas percepções do mundo, é um processo simultaneamente individual e social. É um processo individual, na medida que se aceite que essas percepções e a organização das ideias é influenciada pela natureza individual de cada ser humano. E é um processo social na medida em que, como conhecimento público, é fruto de uma interacção entre inteligências e culturas.

Num artigo contido numa excelente colectânea de textos de vários autores sobre as relações entre a natureza da Ciência e a educação científica, Rosalind **Driver** (1989, p. 85) apresenta de modo claro a perspectiva segundo a qual o ser humano, através da sua actividade mental, da sua vivência no meio e as suas interacções sociais, constrói e reestrutura os seus esquemas acerca do mundo que o rodeia. E a dada altura escreve o seguinte: "*A Ciência, como conhecimento público, é também pessoalmente e socialmente construída....*".

Ao debruçarmo-nos, no Capítulo 3, sobre a natureza da Ciência, apresentaremos alguns argumentos para sustentar esta hipótese.

(3) A velha ideia de que a Ciência foi descoberta por um número reduzido de iluminados, os *génios*, está epistemologicamente ultrapassada, como veremos no Capítulo 3.

No processo de construção lenta e gradual da Ciência, através da ultrapassagem de obstáculos permanentes, por vezes de dimensões tais que geraram crises epistemológicas, sempre existiram alguns homens, que se distinguiram dos demais, por darem «**grandes saltos no escuro**», isto é, por terem a intuição de apontarem saídas para ultrapassarem esses obstáculos. Mas a genialidade desses homens só se tornou possível graças ao trabalho de muitos outros, alguns deles uns ilustres desconhecidos, pelo menos do grande público.

(4) A afirmação de que "*a experiência é a madre de todas as cousas*" é de **Duarte Pacheco Pereira** e aparece mais do que uma vez no «*Esmeraldo de situ orbis*». A natureza do conhecimento do mundo físico e o papel da experiência na construção desse conhecimento e no ensino da Física também serão discutidos neste trabalho.

(5) De acordo com **Gowin** (1990, p. 62) o *ensino*, no contexto da educação, é "*um acontecimento social no qual os seres humanos conseguem compartilhar significados*". O ensino é, de facto, uma espécie de negociação de significados, no fundo de representações da realidade, entre professor e aluno (aliás, o investigador Joseph Novak, da Universidade de Cornell, utiliza muitas vezes o termo *negociação* quando se refere ao ensino). Conforme será fundamentado posteriormente, **o ensino e a aprendizagem são processos bastante distintos**. A **aprendizagem** é (Gowin, 1990, p. 124) "*uma activa reorganização de uma rede já existente de significados*". Trata-se de um processo idiossincrásico, que cada aluno terá de efectuar por si. Ninguém poderá aprender por ninguém.

Quando falamos em que o aluno acede às concepções físicas, queremos dizer exactamente que se produziu nele uma mudança conceptual correcta, tendo ele próprio construído representações iguais às dos físicos acerca de um objecto ou de um fenómeno.

(6) Dada a natureza das **Ciências da Educação**, os resultados da investigação no seu domínio têm quase sempre um enorme peso contextual, e não têm, em geral, a pretensão de garantir a universalidade inerente aos resultados obtidos nas ciências exactas como é a Física. Este facto em nada diminui o mérito dos resultados da investigação educacional, já que o objectivo desta também tem em conta, quase sempre, um determinado contexto. Concretizando, esta investigação tem como objectivo contribuir para a valorização dos professores de Física *do nosso país*. Se o conseguir, tem muito mérito por isso. Não é de espantar, pois, que a grande maioria das *respostas* que se obtiveram para a questão formulada só pretendam ter validade no domínio e no contexto em que decorreu a investigação. Um certo número de resultados obtidos, porém, porque confirmaram resultados alcançados noutras investigações que constam da literatura científica consultada, possuem um valor mais universal.

(7) Um *diálogo* breve e curioso, travado há alguns anos com um antigo companheiro de curso e professor de Física do ensino secundário, ilustra este facto:

-Estive a estudar a nova edição do teu livro e reparei que mudaste a relação que traduz as transferências de energia no caso em que um corpo se move com atrito ao longo de um plano inclinado.

- Ah, sim? Mas não tenho ideia de a termos mudado. Se a situação é a mesma as transferências de energia têm de ser as mesmas.

- Oh, afinal conheço melhor os teus livros que tu próprio!

Ao analisar a alteração verificámos que, na edição anterior, se considerava o plano inclinado como exterior ao sistema em estudo, e nessa edição considerava-se como fazendo parte do sistema. Este professor (e não apenas ele) conhecia melhor o livro adoptado na escola que um dos seus autores. Quem produz livros escolares sente bem a necessidade de se actualizar e colocar em prática novas estratégias de ensino.

Ora, ao procurar a inovação, e como resultado da sua permanente actualização, um autor afasta-se muitas vezes das estratégias usadas nos seus próprios livros, acabando até por as esquecer mais facilmente que outros professores.

(8) Desconhece-se a proveniência desta designação, mas ela tem sido referida ultimamente em algumas conferências para traduzir ciências de índole quantitativa como a Física e a Química.

(9) «*Learning how to learn*» é também o título de um livro escrito por J. **Novak** e D. **Gowin**, que constitui um dos pilares que também serviu de base à preparação da metodologia aqui utilizada. Um outro pilar foi um livro importante sobre Educação, «*Educating*» (1990), escrito pelo epistemólogo e educador D. **Gowin**. Foram estas as fontes que conduziram à escolha da metodologia, que será apresentada no próximo capítulo.

CAPÍTULO II

PROBLEMATIZAÇÃO E METODOLOGIA

(1) No glossário está definido o **conceito** como sendo um registo da mente humana a que corresponde um signo ou símbolo e que traduz regularidades em determinados acontecimentos/objectos. Quando o seu significado é compartilhado por uma comunidade científica dizemos que se trata de um **conceito científico**. Assim temos, por exemplo, o conceito de mesa, que traduz as regularidades existentes em determinados objectos a que se convencionou chamar mesas. Um outro exemplo, este mais abstracto, é o conceito físico de inércia. Traduz regularidades que se observam no movimento dos corpos, em particular a tendência para eles manterem o seu estado cinético.

(2) Os **conceitos**, mormente os conceitos físicos, são **construções da mente humana**. Assim, a natureza não nos proporciona a massa inercial, mas, sim, os corpos e seus comportamentos, com base nos quais construímos mentalmente o conceito de massa inercial. Como tudo o que é fruto do pensamento de seres humanos, os conceitos têm um valor relativo, são discutíveis, e poderão ser ou não contestados por outros seres humanos.

(3) Os **juízos de valor educacional** pretendem responder a questões de valor intrínseco (*X é bom?*), ou de valor instrumental (*X é bom para Y?*), ou de valor comparativo (*X é melhor que Y?*) ou de valor para decisão (*X deve ser adoptado?*) , ou de valor idealizado (*X ainda podia ser melhor?*). Estes tipos de questões (Novak e Gowin, 1992, p. 173) dão ideia do que são os juízos de índole educacional e não deixam dúvidas quanto à carga afectiva e eminentemente pessoal que encerram.

Apesar de tudo, e se valor é o que sustenta as coisas, é o que une as opiniões e não o que as divide, ao produzirmos as afirmações de valor educacional estamos à espera que elas sejam compartilhadas por uma significativa maioria das pessoas que vierem a debruçar-se sobre o nosso trabalho.

CAPÍTULO III

UMA REFLEXÃO EM TORNO DA FILOSOFIA DA CIÊNCIA

(1) Concordando, ou não, com as teses aqui defendidas, os professores não deixarão de reflectir sobre as questões em que se baseiam, e isto é que é importante. Não se trata de lhes impingir determinados pontos de vista filosóficos, sempre discutíveis. Trata-se, sim, de os sensibilizar para uma coerência e uma actualização epistemológica do seu discurso, com um impacto positivo nas concepções físicas que ensinam.

(2) Há uma tradução portuguesa desta obra intitulada *A Filosofia das Ciências Hoje*. Pertence à colecção *Ideias*, da *Editora Fragmentos*. Nesta obra colaboraram, entre outros, Jean Hamburger, Anatole Abragam e Pierre Jacob, todos eles académicos de reconhecido prestígio. Toda a obra tem muito interesse epistemológico, particularmente o prefácio de Hamburger, o capítulo «O método experimental: um mito dos epistemólogos (e dos sábios)», de Thom e o capítulo «Teoria ou experiência: um debate arcaico», de Abragam.

(3) Durante muitos anos, a Ciência (particularmente a Física) e a Filosofia não estiveram tão afastadas como estão hoje.

Assim, o criador da álgebra dos polinómios e da geometria analítica é o mesmo René *Descartes* (1596-1650) que escreveu os *Princípios da Filosofia* e o *Discurso do Método*, este último estudado hoje em qualquer curso de Filosofia, mesmo elementar.

Blaise Pascal (1623-1662), que aos 16 anos redigia um célebre ensaio sobre as cónicas, despertando para uma brilhante carreira como físico e matemático, é o mesmo homem que escreveu os *Pensamentos* e outras obras filosóficas importantes.

Quem ler os *Princípios Metafísicos da Ciência da Natureza*, de um dos maiores filósofos de sempre, Immanuel *Kant* (1724- 1804), sente bem o seu grau de domínio da Mecânica de Newton, independentemente de considerar ou não cumprido o objectivo da obra.

Mais recentemente, o autor da corrente convencionalista, em Filosofia, é nada mais nada menos que um dos maiores matemáticos do século passado e início do nosso: Henri *Poincaré* (1854-1912).

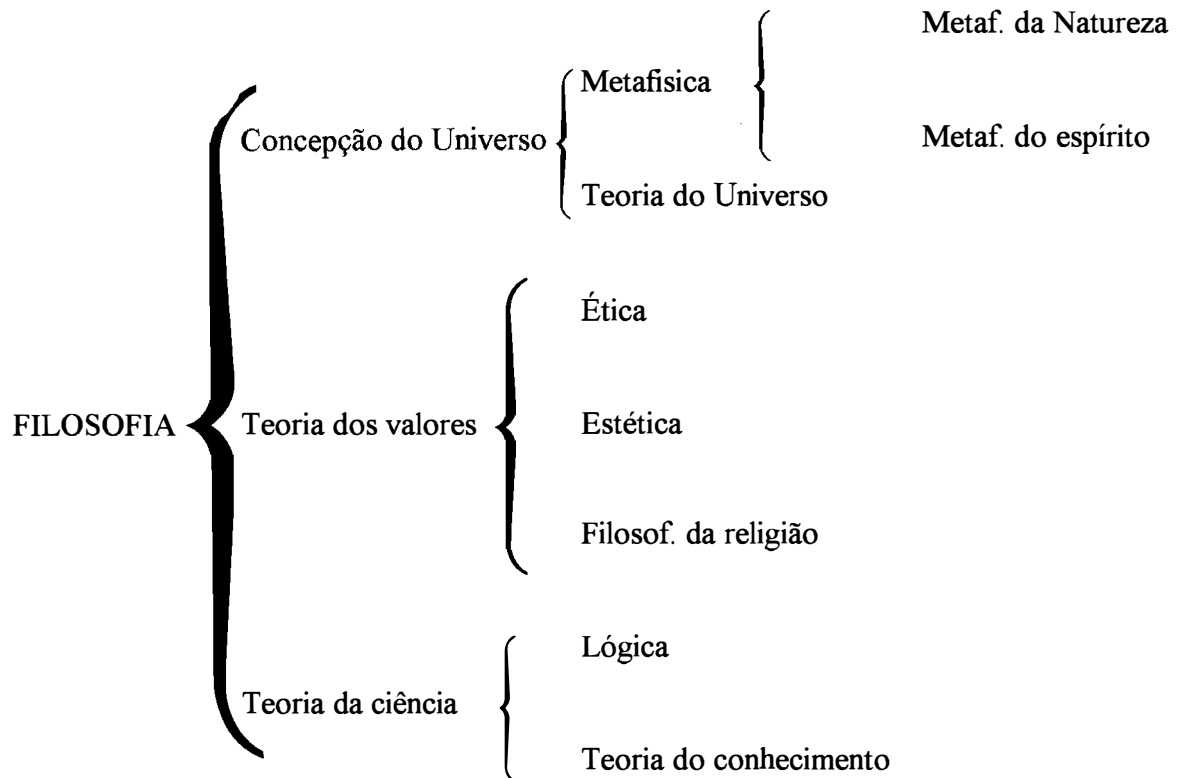
E que dizer do debate filosófico suscitado pela *Escola indeterminista de Copenhaga*, e pela *Escola neopositivista do Círculo de Viena*, ambas alicerçadas em trabalhos de cientistas e filósofos notáveis como Ernst *Mach*, Niels *Bohr*, Werner *Heisenberg*, Rudolf *Carnap* e tantos outros?

Foram determinadas visões extremistas da Ciência, tanto empírico-positivistas como racionalistas, acompanhadas por uma infeliz separação da Filosofia das faculdades onde se estuda Ciência, que afastaram a Ciência da Filosofia. Os cientistas que defenderam e defendem esse divórcio nem sequer se dão conta que estão a assumir uma posição filosófica importante, a qual, no mínimo, merece ser discutida.

Aconteceu que a Física do nosso século, e, particularmente, a Mecânica Quântica, fez desabrochar novas formas de pensamento que evidenciaram a necessidade do debate filosófico entre cientistas. Surgiram problemas que obrigam a um debate em profundidade, principalmente agora que o progresso técnico tornou possível realizar experiências que, no tempo do célebre debate epistemológico Bohr-Einstein, só podiam ser concebidas mentalmente. A eles nos referimos noutro local.

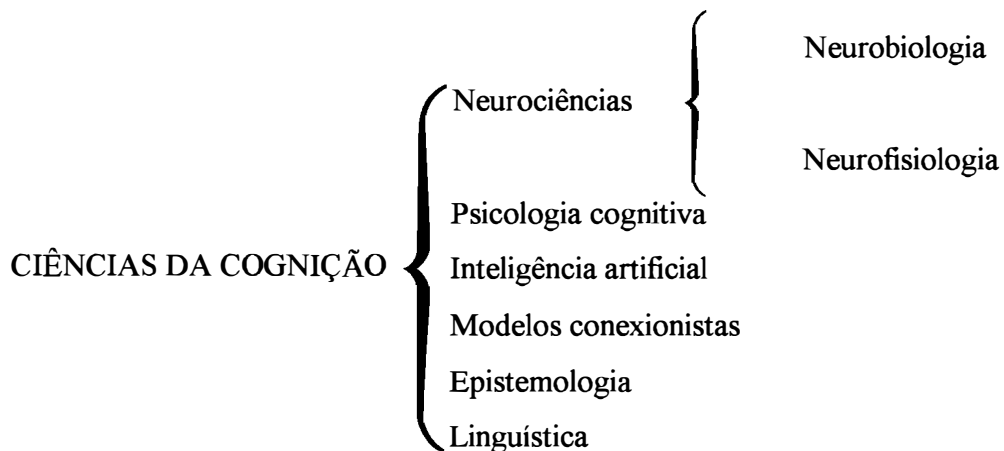
(4) Com base na distinção das diversas disciplinas filosóficas feita por Hessen (1987), elaborámos a seguinte classificação da Filosofia.

ÁREAS DA FILOSOFIA



(5) As *Ciências e Tecnologias da cognição* poderão ser classificadas do seguinte modo (Varela, 1992):

CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS DA COGNIÇÃO



(6) Na página 27 do seu livro «*Adeus à Razão*», Feyerabend escreve:

" ... alguns pensadores, tendo ficado confusos e abalados com as complexidades da história, disseram adeus à razão e substituíram-na por uma caricatura; (...) A Razão tem tido enorme sucesso entre os filósofos que abominam a complexidade e os políticos (tecnocratas, banqueiros, etc., etc.) que não se importam com dar um pouco de estilo à sua luta pelo domínio do mundo. É um desastre para os restantes, isto é, praticamente para todos nós. Já é tempo de lhe dizermos adeus" (1991, p. 27).

(7) Assim, por exemplo, os **pitagóricos** sustentavam a hipótese de que todos os seres do Universo, assim como a sua natureza e o seu comportamento, são formuláveis matematicamente.

É sabido como esta ideia da natureza matemática do mundo se repercutiu ao longo dos séculos, tendo influenciado grandes cientistas como Kepler e Galileu. Influenciou também **Platão**, idealista que defendia a existência no Universo de dois mundos distintos:

- O **mundo das Ideias**, um mundo supra-sensível, plenamente racional, organizado hierarquicamente. As Ideias (e entre elas as ideias matemáticas - a circunferência, o triângulo, o quadrado, etc) eram consideradas entidades reais, permanentes e imutáveis, modeladas na matéria, o mais perfeitamente possível, por uma Inteligência ordenadora (o Demiurgo).
- O **mundo físico**, ou mundo sensível, percebido pelos sentidos, cujos seres são mutáveis e corruptíveis.

Platão privilegiou claramente o primeiro mundo em relação ao segundo, tanto em termos ontológicos como epistemológicos.

Com efeito, considerava as ideias realidades objectivas que são apreendidas através de uma intuição não sensível. Por meio desta intuição, captamos as estruturas matemáticas, as essências inteligíveis que formam o Universo. Os sentidos proporcionam o conhecimento do mundo sensível, mas esse conhecimento não conduz à verdade autêntica. Voltaremos a referir o idealismo platónico a propósito do problema da essência do conhecimento.

Outros filósofos gregos procuraram ver na água, no ar, na terra, no fogo, ou em misturas destes elementos, a última essência e a causa do comportamento dos corpos terrestres, e no éter a essência dos astros. É o caso de **Aristóteles** de Estagira (384-322), por exemplo.

Aristóteles, ainda que mantivesse parte do idealismo platónico (por exemplo, a ideia da circunferência como movimento perfeito e, portanto, próprio da quinta essência, constituinte do mundo supra-lunar ou da matéria incorruptível), era um naturalista que valorizava, muito mais, o mundo sensível. Distinguia claramente as flores, os frutos, os animais e todos os outros corpos naturais, compostos por «matéria» e «forma», das substâncias imateriais (anjos, arcanjos, etc.) que eram simples formas descarnadas e vazias de qualquer tipo de matéria.

(8) As bases fundamentais do sistema aristotélico que a Ciência Moderna, fundada por Copérnico, Kepler, Galileu e Descartes, derrubou, podem resumir-se no seguinte quadro:

O Universo segundo Aristóteles

É fechado, geocêntrico, finito e teologicamente ordenado.
É heterogéneo, isto é, composto pelo mundo sublunar da matéria corruptível e pelo mundo celeste, da quinta essência, incorruptível e inalterável.
Na cúpula do mundo está o Motor Imóvel, o acto puro, Deus.
Abaixo do motor imóvel e sujeito à sua vontade está o Primeiro Motor que põe em movimento a esfera celeste das estrelas fixas.
Saturno, Júpiter e os restantes astros têm movimento circular e uniforme por ser este movimento sem princípio nem fim platonicamente perfeito.
As orbes celestes esféricas, concêntricas e cristalinas estão centradas na Terra imóvel.
São as esferas celestes que determinam o tempo.
A Terra, em repouso no centro, está estruturada de acordo com a ordem de quatro elementos ou essências terrestres: terra, água, ar e fogo.
No mundo sublunar, os corpos têm movimento natural, causado pela tendência para ocuparem o lugar natural, ou violentos, enquanto e só enquanto actuam forças.
O movimento natural é rectilíneo, vertical e uniforme; os corpos mais pesados caem com maior velocidade.
Os movimentos horizontais e oblíquos são sempre violentos, devidos a uma força de contacto que actua sobre os corpos e cessam quando a força deixa de ser aplicada.
O movimento uniforme deve-se à aplicação de uma força constante.
Em todo o movimento o móvel é travado por uma resistência do meio.
Se não houvesse um meio resistente os corpos passariam instantaneamente ao seu lugar natural, o que é absurdo.
Consequentemente tem de haver sempre um meio resistente e nunca o vazio.

(9) Esse surto de desenvolvimento da Ciência ficou a dever-se a factores tais como:

- a divulgação renascentista das obras de grandes sábios gregos, tais como Pitágoras, Euclides e Aristóteles;
- a redescoberta da ideia pitagórica de que o Universo possui uma estrutura e ordem matemática: portanto, as leis por que se rege devem ser formuláveis matematicamente;
- o impulso dado à observação e à experimentação pelos filósofos nominalistas a partir do século XIV;
- necessidades de ordem técnica.

(10) Já há muito existiam modelos realistas e modelos positivistas. Assim, por exemplo, *a concepção aristotélica do Universo era uma concepção realista*, porque ambicionava traduzir, em termos lógicos, a realidade autêntica acerca do Universo, enquanto *que a conhecida concepção astronómica de Ptolomeu era positivista*, isto é, apenas tinha a pretensão de descrever, com base em dados astronómicos, e, portanto, a partir do observável, o que aparece: o aparente e não o real. Porque era positivista e não realista, o modelo de Ptolomeu revelou-se bastante flexível. Recorrendo à excentricidade das órbitas, aos epiciclos, aos deferentes e aos equantos, o modelo ia-se moldando melhor ou pior aos novos dados astronómicos, prevendo com bastante exactidão para a época os fenómenos futuros, assim se mantendo durante muitos séculos. Porém, confrontado com os dados astronómicos cada vez mais exactos da observação, acabou por ser substituído, porque, a determinada altura, se tornou demasiado complicado.

(11) Entre as ideias novas acerca do Universo que se foram impondo (algumas ressurgiram de velhas ideias de filósofos gregos, como Aristarco de Samos), poderemos destacar as seguintes:

- o Universo não tem limites nem centro em parte alguma (Nicolau de Cusa);
- a Terra roda em torno de si mesma (Nicolau de Oresme);
- o Sol está no meio dos astros e a Terra e os demais planetas giram em torno do Sol (Copérnico);
- o mundo é infinito, e nele existem inumeráveis sistemas solares iguais ao nosso; o nosso Sol não é mais do que uma entre milhões e milhões de estrelas (Giordano Bruno);
- os planetas movem-se em órbitas elípticas, situando-se o Sol no foco dessas elipses (Kepler);
- o segmento que une o Sol a um planeta varre áreas iguais em tempos iguais (Kepler);
- os quadrados dos períodos de revolução solar dos planetas são proporcionais aos cubos dos semi-eixos maiores das respectivas órbitas elípticas (Kepler);
- a Lua é formada de montanhas e vales como a Terra e não de matéria incorruptível (Galileu);
- Júpiter tem satélites, tal como a Terra (Galileu);

- Vénus apresenta fases, o que só pode explicar-se pelo movimento relativo de Vénus em relação à Terra, móvel em torno do Sol (Galileu);
- a nova «estrela» (na realidade um cometa), surgida em 1577, encontra-se para além do mundo sub-lunar e a sua presença só pode ser explicada pelo modelo de Copérnico (Mastlin).

(12) É, quanto a nós, uma visão discutível do problema, pois não nos parece que a Ciência desse tempo, onde pontificava a Mecânica de Newton, pudesse prescindir de toda as explicações metafísicas. A Física desse tempo formulava hipóteses, e algumas bem místicas como a hipótese newtoniana do espaço absoluto e do tempo absoluto. Além disso, o idealismo berkeliano está longe de ser o idealismo actual. Tal como afirma António Sérgio, no prefácio ao livro de Bertrand Russell, *Os Problemas da Filosofia* (Russell, 1980) há uma grande tendência para identificar o idealismo com o imaterialismo de Berkeley e “*dar a refutação da metafísica de Berkeley como se fora uma refutação do «idealismo» em geral*” (1980, p. 15). O idealismo posterior a Kant não nega que a matéria exista. A sua ideia fundamental é a da “*insuperável correlatividade do sujeito e do objecto, considerados como polos de uma realidade única, com a tese de que tudo o que é conhecente - assim como tudo o que é conhecido -, a de que toda sorte de inteligência possível - e toda realidade inteleccionável por nós - constituem uma relação do sujeito e do objecto...*” (1980, p. 16).

(13) A grande estatura de Kant, como filósofo, provém do seu espírito dialéctico, como veremos. Conseguiu elaborar várias sínteses entre correntes filosóficas que até então se confrontavam de modo aparentemente irreconciliável. Uma dessas sínteses fundamentais, que se repercutiu até hoje, é a síntese entre o racionalismo e o empirismo, como veremos. A repercussão da filosofia de Kant na actualidade não significa que as ideias kantianas permaneceram estáticas. Significa que as ideias actuais evoluíram a partir das suas ideias.

(14) Note-se, para não haver equívocos, que podemos apelar para a posição de Kant para ajudar a fundamentar a impossibilidade de conhecer a verdadeira natureza ou essência dos objectos, mas não para fundamentar o criticismo na sua forma actual. Kant era um filósofo idealista transcendental. Profundamente influenciado pela Física de Newton, onde reinam o espaço e o tempo absolutos, considerava o espaço e o tempo como representações puras, *a priori*, que servem de fundamento a todas as intuições exteriores. Conjuntamente com os chamados conceitos puros ou categorias transcendentais, o espaço e o tempo unificam e coordenam os dados sensíveis, mas nada têm a ver com os fenómenos. Esta concepção de que o espaço e o tempo nada têm a ver com os fenómenos é hoje inaceitável. Por outro lado, a classificação das afirmações ou juízos segundo Kant, afigura-se-nos, hoje, também inaceitável.

(15) O racionalismo cartesiano legou uma visão mecanicista da Natureza, assente nos seguintes postulados:

- Os objectos naturais reduzem-se a pontos materiais que encham todo o espaço euclideano, infinito, isotrópico e tridimensional e estão em perpétuo movimento nele.
- Os corpos mais densos de matéria, caso dos astros, foram-se distribuindo do modo como estão no Universo, devido a um movimento universal em turbilhão.
- Os interstícios desses corpos mais densos estão cheios de um éter, constituído por partículas subtis, transparentes e em movimento contínuo.
- Nos interstícios do éter e propagando-se através dele existe a luz, formada por corpúsculos ainda mais pequenos que os do éter.
- Toda a acção de um corpo sobre outro só se pode fazer por contacto.

- A Natureza é explicada em termos matemáticos, com base em figuras e movimentos, e com base em leis que regem os movimentos dos pontos materiais e as acções entre eles.
- Os princípios que regem a máquina universal são essencialmente dois: o princípio da inércia e o princípio da conservação da quantidade de movimento.

(16) O grande êxito da Mecânica newtoniana revelou-se não só na interpretação do movimento de uma partícula como no estudo dos sistemas de muitas partículas, tirando partido da noção matemática de probabilidade.

Com a Mecânica Estatística, o *determinismo laplaciano* ou conhecimento das previsões certas e infalíveis deu lugar ao conhecimento de uma probabilidade rigorosamente calculada, a um *determinismo estatístico*. E o sucesso continuou a ser enorme, conforme o comprovam todas as previsões confirmadas da Mecânica Estatística.

(17) O *positivismo* surgiu ao lado do marxismo como reacção imediata ao idealismo de Hegel (Cordon e Martinez, 3º vol. p. 7). Porém, como atitude que é, pode-se considerar uma constante na história do pensamento.

Outras reacções ao idealismo de Hegel foram, por exemplo, o *vitalismo* de Nietzsche, reacção contra o intelectualismo religioso tradicional, por se opor à vida e aos valores vitais, e o *existencialismo* de Kierkegaard, que procura defender os valores individuais e a singularidade de cada um contra o idealismo de Hegel, que desvaloriza esses valores em favor da totalidade ou globalidade.

As ideias de Hegel, por vezes altamente obscuras, mormente no que se refere aos conceitos científicos, contribuíram para que a Ciência se afastasse da Filosofia e adquirisse uma forma positiva.

(18) Auguste **Comte** (1798-1857), que escreveu o *Curso de Filosofia Positiva*, é considerado o pai do positivismo moderno. Ele introduziu o conceito de *estado*, para indicar cada um dos estádios por que vai passando o espírito humano no desenvolvimento e na prossecução do fim que lhe está destinado segundo a sua natureza. E, pela própria natureza do espírito humano, cada ramo do nosso conhecimento, e em particular a Física, está necessariamente sujeito a evoluir, passando por três estados diferentes:

- o *estado teológico*, em que se pretende conhecer o porquê dos fenómenos com base em causas últimas e sobrenaturais; baseia-se na imaginação apenas, e o conhecimento tem um carácter absoluto;
- o *estado metafísico*, em que se pretende conhecer o porquê dos fenómenos com base, já não em causas últimas e sobrenaturais, mas a partir da sua essência ou natureza: baseia-se também na imaginação, e o conhecimento tem igualmente um carácter absoluto;
- o *estado positivo*, em que se pretende conhecer como ocorrem os fenómenos e não o porquê dos mesmos, cinge-se ao conhecimento de regularidades a que obedece o objecto do conhecimento, e este tem um carácter relativo: é o estado definitivo em que fica o conhecimento, fundamentalmente descritivo - é assim porque acontece assim.

O conhecimento culmina no estado positivo e é relativo, pois manifesta-se a cada sujeito de acordo com este.

(19) António **Sérgio**, por exemplo, no prefácio ao livro de Russell «*Os Problemas da Filosofia*» que traduziu, começa por dizer:

“Com pequenina parte, tão só, deste formoso livro, me sinto eu propenso a manifestar acordo”.

E mais adiante (1980, p. 19) afirma:

“A verdade, para o tal moderno «idealista», define-se pela coerência entre ideia e ideia; para o nosso autor, é ela a correspondência entre a ideia e o facto, quer dizer: define-se pela correspondência entre uma coisa isolada (que é a nossa crença) e outra coisa isolada (que é o chamado «facto») impossíveis de avaliar por um comum critério, incapazes de ajustar-se sobre um mesmo plano (...).

Como saber, no entanto, se existe o «facto» correspondente à crença, e se os vários termos que o constituem, tomados na ordem que na crença têm, formam de feiti uma unidade complexa, - senão através de umas tantas ideias, e da coerência que notarmos entre tais ideias? Admitida a existência de um pensamento isolado, e também a existência de um «facto» isolado, como conceber uma correspondência entre os dois? Pois não parece, bem pesadas as coisas, que a dita correspondência se verifica sempre, não entre o pensamento e o que se diria o «facto» (o «facto» concebido à maneira de Russell), mas sim entre o pensamento e um pensar sobre o facto, e uma ideia sobre ele?”

(20) **Wittgenstein** abandonou três teses fundamentais do atomismo lógico, a saber (Cordon e Martinez, 1987, 3º vol. pp. 160 a 162):

- a de que os factos têm forma lógica, independente da nossa manipulação linguística, que era o pilar da linguagem-retrato;
- a de que os factos elementares ou atômicos constam de elementos simples, uma vez que o conceito de elemento simples é relativo ao contexto e à linguagem usada;
- a de que o significado de um termo traduzido linguisticamente corresponda, exactamente, ao seu significante ou referente extralinguístico.

(21) A influência da Teoria da Relatividade nos membros do *Círculo de Viena* é por demais evidente. Assim, por exemplo, em 1932, Reichenbach escrevia o seguinte:

“...no meu tempo livre (por volta de 1918) estudei a Teoria da Relatividade; assisti às aulas de Einstein na Universidade de Berlim... A Teoria da Relatividade impressionou-me imenso e levou-me a um conflito com a filosofia de Kant. A crítica de Einstein ao problema do espaço-tempo fez com que eu me desse conta de que o conceito de a priori de Kant não se pode manter” (Ron, 1983 , p. 17).

E muitos outros membros do *Círculo de Viena* publicaram trabalhos que revelam a influência da Teoria da Relatividade neles.

Perfilhamos a opinião de que a Teoria da Relatividade assinala um corte epistemológico. Muitos filósofos abandonaram quase imediatamente o sistema kantiano. O mesmo Reichenbach escrevia em 1936: *“... influenciado pela Teoria da Relatividade, rompi com o sistema kantiano”* (Idem, Ibidem).

O *operacionalismo* também foi manifestamente influenciado pela Teoria da Relatividade, onde Einstein fez uma análise das operações levadas a cabo para medir o espaço e o tempo (o tempo medido por uma simultaneidade, o acerto dos relógios, a medição do comprimento em condições de simultaneidade de observação das coordenadas extremas, etc.).

(22) O aspecto mais positivo da filosofia de Hegel é ter-se apercebido de que o conhecimento do mundo tem uma estrutura dialéctica porque o próprio mundo é dialéctico, tal como aliás o grego Heraclito - o pai da dialéctica, já admitia. E o mundo é dialéctico porque é dinâmico, evolutivo, permanentemente síntese entre o todo e as suas diversas partes, em que a unidade resulta da diferenciação e a diferenciação é comandada pelo todo unitário. Nele tudo influencia tudo e *"o verdadeiro é o todo"* (Cordon e Martinez ,1984, p. 196).

Acontece que Hegel, idealista absoluto, acabou por reduzir totalmente o objecto ao sujeito, o ser ao pensar. O seu sistema, onde "*transparece um pouco por todo o lado uma grande ambiguidade*" (Ibidem, p. 207) acabou por abrir duas vias. Numa delas, a via idealista, o seu sistema viria a converter-se numa teologia racionalizada e acabou, no dizer de Feurbach, por transformar a realidade num *descarnado e puro pensamento*. Uma outra via de sentido oposto, a via materialista, seguida por Feuerbach, Strauss, Bauer, Marx, Engels, etc, viria a redundar no materialismo dialéctico.

Pensamos que entre estas vias opostas será possível existir dialecticamente uma via de síntese, uma via que nem conduz ao materialismo extremo nem ao idealismo extremo, mas adiaremos esta discussão para quando tratarmos da essência do conhecimento.

(23) A Ciência do mundo físico está actualmente impregnada de positivismo, particularmente na forma mais acabada deste, que é a do *Círculo de Viena*. Este facto tem aspectos positivos e negativos. Quando assume a forma de cepticismo religioso ou agnosticismo, por exemplo, afigura-se-nos positivo, particularmente por combater o objectivo pretensioso de provar a existência ou a não existência de Deus com argumentos físicos. A Física lida com conceitos abstractos... mas não tanto! Quando, pelo contrário, levado a um extremo doentio, o positivismo procura privar os cientistas de toda a especulação metafísica, torna-se limitativo e propiciador de uma imagem errada da Ciência.

Deve-se ao positivismo excessivo o divórcio entre a Ciência e a Filosofia. No tempo em que o divórcio entre filósofos e cientistas não acontecia (ainda havia ilusões a respeito da «certeza apodíctica», e os filósofos e cientistas comungavam dos mesmos problemas), um grande filósofo e grande cientista como Descartes, vivia intensamente o problema da realidade. Teve que se agarrar à capacidade de cogitar para se convencer da sua própria existência. Da sua existência passou à existência de Deus. E acreditou em Deus como garante da verdade absoluta acerca dos «objectos». Construiu a sua Física a partir da sua Metafísica.

Hoje, temos de ser um pouco mais positivistas que Descartes. Deveremos partir da Física e do seu conhecimento factual possível se quisermos discutir Metafísica. Se nos lembrarmos que Newton também recorria a Deus como garante da existência do espaço e do tempo absolutos, teremos mais um exemplo da dificuldade com que se debateram grandes pensadores ao tentarem levar o conhecimento até à espinal medula dos fenómenos, *ao pretenderem estabelecer o conhecimento das verdades absolutas e eternas acerca dos objectos universais*. Respeitemos o seu racionalismo exagerado, a sua fé excessiva no poder da razão, a sua atitude não positivista. Mas, sem confundir os campos, tendo consciência quando estamos a fazer ciência ou a filosofar, não nos privemos de especular metafisicamente, particularmente se essa especulação se debruça sobre um «objecto» que, por tão complexo, está ainda tão mal conhecido: o próprio conhecimento, o fruto da interacção entre a nossa mente e o mundo.

Nesta ordem de ideias, é ainda hoje polémica a interpretação dos fundamentos da Mecânica Quântica. Opõem-se duas correntes uma causalista, e outra indeterminista. A primeira admite que deverá algum dia ser possível encontrar uma explicação possível, em termos de causa-efeito, para as estranhas e sobejamente conhecidas experiências da Mecânica Quântica: experiência da dupla fenda, experiência de Grangier, Roger e Aspect, etc.

A segunda admite que não. Essas experiências não podem ser descritas em termos de uma sequência causal de acontecimentos. Não há que procurar nada por trás dos factos, já que nada existe por trás deles. O papel dos físicos deve limitar-se a efectuar medições, recolher dados e efectuar previsões, sem procurar qualquer tipo de explicações causais.

Perante duas teses opostas, e muito embora sabendo que uma delas, a ortodoxa, transporta consigo o peso dos triunfos conseguidos e o prestígio na área da Física Quântica dos seus defensores, que devemos fazer, nós que defendemos o criticismo?

Tentar analisar criticamente todas as informações de que vamos tendo conhecimento, abstando-nos de tomar qualquer posição intransigente, antes de sermos confrontados com os resultados de uma experiência crucial, que teima em não surgir (por dificuldades de ordem técnica). E, entretanto, nada obsta a que assumamos uma posição ontológica, seja ela descrente de qualquer realidade exterior ao sujeito que observa (a realidade é criada por este), ou acreditando que há um mundo exterior, ainda que incognoscível em termos plenos... e não há que haver receio de que apareça por aí um outro Schopenhauer a meter-nos no manicómio!

(24) Um exemplo entre muitos que poderíamos apresentar: a investigação de Rumford que contribuiu decisivamente para a abolição da ideia do calórico.

Em 1798, Benjamin Thompson, o Conde de Rumford, dirigia no arsenal de Munique os trabalhos de perfuração dos canhões. Para evitar grandes aquecimentos mandou encher de água o interior dos canhões. Verificou que, após algum tempo de fricção provocada pela broca, a água entrava em ebulição. *Reflectindo* sobre a possível explicação para tão grande produção de calórico, só encontrou uma *hipótese* possível: ao dividir-se uma substância em partículas cada vez menores, a capacidade térmica (que naquele tempo era definida como capacidade para reter o calórico) tornava-se também cada vez menor. De acordo com esta hipótese, a capacidade da cisalha obtida para reter o calórico era menor do que a do bronze inicial. Havia, assim, um desprendimento de calórico para a água, o que explicava o aquecimento desta.

Porém, Rumford realizou experiências tendentes a verificar o seguinte:

- a elevação da temperatura da água conseguia-se mesmo sem produção de cisalha;
- massas iguais de bronze e de cisalha, aquecidas à mesma temperatura, e colocadas em massa iguais de água, produziam nestas iguais elevações de temperatura, o que provava que tinham capacidades térmicas iguais.

Concluiu, então, que a hipótese que racionalmente tinha colocado não era corroborada pela experiência. E inferiu que a única resposta possível para o problema era esta: não era uma substância material (o calórico) que explicava um tão grande aquecimento, mas o próprio movimento. O calor não podia ser uma substância mas o resultado do movimento.

Vemos aqui claramente em jogo as duas componentes do conhecimento: a *experiência* e a *razão*.

(25) Na sua obra «*Princípios da Filosofia*», Descartes escreve (1989, p.42):

"Assim toda a filosofia é como uma árvore, cujas raízes são formadas pela metafísica, o tronco pela física e os ramos que saem deste tronco constituem todas as outras ciências que, ao cabo, se reduzem a três principais: a medicina, a mecânica e a moral (...)

Ora como não é das raízes nem do tronco das árvores que se colhem os frutos, mas tão-somente das extremidades dos ramos, a principal utilidade da Filosofia depende, portanto, daquelas partes que são apreendidas em derradeiro lugar."

(26) O pensamento, segundo **Descartes**, é progressivo e não regressivo. Parte das ideias ao encontro dos objectos e não destes ao encontro das ideias. O ponto de partida do conhecimento é a ideia intuitiva simples, não o objecto da sensação complexa. Essas ideias, esses actos mentais são os "*modos de pensamento*":

- umas provêm do contacto com uma realidade exterior, por exemplo, a de árvore, flor, gato, etc. (*ideias adventícias*), de cuja veracidade Descartes duvida, porque se baseiam em percepções enganadoras;

- outras são construídas pela mente a partir de outras ideias, como por exemplo, a de sereia (*ideias factícias*) e, por isso, a sua validade é questionável;

- finalmente, as mais importantes, que não provêm da realidade exterior, nem são construídas pela mente, existem no próprio pensamento, como por exemplo a ideia de pensamento, auto-existência, Deus, ideias matemáticas, etc (*ideias inatas*).

(27) Suponhamos, por exemplo, que iniciamos um aquecimento prolongado da água de uma panela. Antes mesmo de assistir ao facto futuro da entrada em ebulição, todos acreditamos que esse facto sucederá. Porquê?

Os racionalistas do séc XVII, que acreditavam que há grandes princípios *a priori*, entre eles o da causalidade, responderiam de um modo semelhante a este: As mesmas causas produzem sempre os mesmos efeitos. O aquecimento prolongado da água é a causa da ebulição da água. Há uma conexão necessária entre o aquecimento prolongado da água e a sua ebulição. Que a água entrará em ebulição ao ser aquecida prolongadamente é conhecimento certo, infalível.

O empirista Hume daria outra resposta. Que a água entrará em ebulição é uma suposição que fazemos com grande convicção, mas não temos o conhecimento certo e infalível que isso sucederá. Essa convicção, que se assemelha a uma certeza, tem uma raiz empírica. Resulta do costume ou hábito de termos visto sempre a água ferver quando se aqueceu prolongadamente. Não há uma conexão necessária entre o aquecimento prolongado da água e a sua ebulição.

(28) É por isso que **Hume** não concorda que Deus seja justificável por qualquer inferência causal (como tinham feito Locke e Berkeley), e também não aceita que se possa passar das impressões sensíveis para uma pretensa realidade corpórea distinta dessas impressões.

(29) O positivismo de **Mill** é muito mais empírico do que o de Comte, pois enquanto Mill considera que o conhecimento científico consiste em estabelecer factos isolados, Comte considera que o conhecimento consiste em estabelecer leis, e estas nunca se obterão a partir da soma de factos isolados. Estas são a expressão das relações entre factos construídos pelo pensamento coordenador (Cordon e Martinez, 1987, p. 30). É que o positivismo de Comte é muito mais uma teoria da realidade, enquanto que o de Mill não passa de uma pretensa teoria do conhecimento

Foi Mill, quem, por coerência com as suas ideias, concebeu a Psicologia como um conhecimento científico absolutamente independente, e com carácter nitidamente associacionista.

(30) Basta ler as secções «*Epístola Dedicatória*», «*Dedicatória Antiga*» e «*A conclusão do livro*» pertencentes ao «*Mistério Cosmográfico*», a obra cujo objectivo era mostrar que «*os cinco corpos geométricos se acham situados entre as orbes celestes*», para se ficar com uma ideia acerca do misticismo de Kepler. A «conclusão» consta do seguinte texto:

“*Agora, amigo leitor, não esqueças o objectivo de tudo isto, que é o conhecimento, admiração e veneração do Artífice Sapientíssimo. Pois de nada serve ter progredido desde os olhos até à mente, desde a visão até à contemplação, desde o devir observável até ao plano mais profundo do Criador, se desejas ficar-te por isto e não te elevares, num só impulso e com toda a devoção da tua alma, até ao conhecimento, amor e culto do Criador. Por isso, com espírito puro e ânimo agradecido, entoa comigo o seguinte hino ao Architecto da obra mais perfeita:*

Deus Criador do mundo e eterno senhor nosso, quão grande é a tua fama pela orbe inteira da Terra!

Quanta é a tua glória! (...)” (e o poema de Kepler a Deus prolonga-se até ao final da conclusão do livro) (Kepler, 1992, p. 218).

A heliolatria de Kepler, tal como a *heliolatria de Copérnico* (Copérnico, 1984, pp. 52 e 53) estavam envolvidas em grande misticismo e até serviam de auto-justificação para as ideias cosmológicas que esses cientistas crentes perfilhavam e que a Igreja não apoiava.

(31) Os historiadores da Ciência não se põem de acordo acerca do método de Galileu (Thuillier, 1983, pp. 584-597). Durante o século XIX, Galileu era reconhecido como um físico experimentalista, o fundador do método experimental. Descreviam-se histórias sobre a queda das balas de canhão e mosquete da torre de Pisa e, bem assim, sobre as oscilações dos candelabros da catedral de Veneza. Porém, há cerca de 70 anos, começou a ser contestada, por parte de historiadores notáveis, como Paul Tannery e Alexandre Koyré, a ideia de Galileu ter recorrido à experimentação na quantidade e na forma como até aí se supunha.

Mais recentemente, outros historiadores da Ciência como Thomas Settle, Stillman Drake, James MacLachalan e Bernard Cohen sustentam a tese de que Galileu foi um experimentador muito mais eficaz do que pensava Koyré.

Há duas décadas atrás, um curso americano de Física, de visão humanista, recomendava a repetição da experiência do plano inclinado de Galileu. Esse curso foi preparado com muito cuidado pelo que é quase certo que os seus autores sabiam que essa experiência conduz a resultados aceitáveis. Mas uma coisa é verificar resultados, outra coisa é estabelecê-los pela primeira vez. Pela nossa parte, recorrendo apenas a uma tábua onde se fez um sulco, uma esfera, bandeirolas e um metrônomo, conseguimos verificar várias vezes a lei galileana segundo a qual os espaços percorridos por um corpo ao longo de um plano inclinado nas sucessivas unidades de tempo estão entre si como os números ímpares. É fácil e dá muito bem. Mas, atenção. Partimos daquilo que íamos verificar. Colocámos as bandeirolas a distâncias que estão entre si como 1 : 3 : 5, e regulámos o cronómetro de modo a emitir sons periódicos à medida que a esfera ia embatendo em cada uma das bandeirolas.

Parece não haver dúvidas de que Galileu jamais «deu espectáculo» perante colegas e alunos na torre de Pisa, conforme certos historiadores da Ciência relatavam.

De facto, Galileu descreveu em alguns escritos inéditos do tempo de Pisa a queda de corpos de pesos diferentes do alto de uma torre que não identifica (Cohen, 1988, p. 241), onde verificou que o corpo mais leve se move inicialmente adiante do pesado, sendo mais veloz.

A experiência de queda de corpos de diferente peso de grande altura já era conhecida desde o tempo de João Filópono, que tinha verificado ocorrer uma pequena diferença nos tempos de queda, o que está de acordo com a teoria actual sobre a queda no ar. Assim, quando uma esfera cai no ar, há uma resistência que cresce com a velocidade e se opõe à força gravítica. Podemos admitir que a força resistente na esfera é dada por $F_r = K S v^2$, sendo K uma constante que depende das unidades escolhidas e S a área do meridiano da esfera. Então, uma bala grande, de canhão, com um raio mais do que quatro vezes maior do que uma bala de mosquete, terá uma força resistente mais do que 16 vezes maior para a mesma velocidade. Quando esta força resistente fica igual à força gravítica $F_g = m g$, a resultante das forças na esfera torna-se nula e a sua velocidade não aumenta mais. A esfera passa a mover-se, a partir de então, com uma velocidade terminal constante.

Para uma altura igual à da torre de Pisa mostra-se que elas chegam ao solo teoricamente com uma pequena diferença de tempo. Porém é decisivo o modo como se abandonam as esferas e, conforme Cohen afirma (1988, pp. 241 a 243) as condições arquitectónicas da torre de Pisa nem são as melhores (conforme verificou ao realizar a experiência perante alguns estudantes durante um congresso em Pisa). Abandonando as esferas com mãos diferentes, a mais pesada parte ligeiramente depois por um efeito de fadiga muscular diferencial dependente do peso.

Galileu sabia muito bem que a queda dos graves na atmosfera está sujeita a uma resistência do ar e que, por isso, atinge uma velocidade constante, e é difícil imaginá-lo a sujeitar-se à realização de uma experiência que antecipadamente sabia ser influenciada por factores que ele estava interessado em secundarizar. Não seria muito mais inteligente usar um bom plano inclinado, mostrar que a lei é a mesma para diferentes inclinações e extrapolar para a situação da queda livre?

(32) Ao produzir um novo conhecimento científico teologicamente independente, **Galileu** procurava harmonizar a Igreja e a Ciência, o que, segundo ele, até era fácil. Bastaria uma separação de poderes. A Igreja mandaria nas questões de fé, desde que não entrassem em contradição com a razão científica, abstendo-se de considerar erético aquilo que não pudesse ser provado cientificamente como falso. A Ciência mandaria nas questões que têm que ver com a razão e não consideraria à letra o que está escrito nos Evangelhos.

(33) São as seguintes as *regras para a investigação da Natureza*, de **Newton**, em linguagem actualizada (Newton, 1990, vol. 3):

1ª - Para explicar as coisas naturais, não admitir outras causas senão as que, simultaneamente, são verdadeiras e bastam para explicar os fenómenos.

Assim dizem os filósofos: a Natureza não faz nada em vão, e é feito inutilmente o que é feito a partir de muitas coisas quando pode ser feito a partir de poucas.

A Natureza é, de facto, simples, e não faz alarde de causas supérfluas.

2ª - A efeitos naturais do mesmo género correspondem causas do mesmo tipo.

3ª - As qualidades dos corpos que não podem variar, e que se encontram em todos os corpos sobre os quais é possível experimentar, devem ser consideradas como qualidades de todos os corpos.

4ª - Na Física experimental, as proposições que se extraem por indução a partir dos fenómenos devem ser tidas por precisamente ou muito aproximadamente certas, até surgirem outros fenómenos graças aos quais essas proposições se tornem mais exactas ou sujeitas a excepções.

É isto que deve fazer-se, e não a destruição de um argumento indutivo com base numa hipótese.

A primeira regra é uma expressão da famosa «*navalha de Ockham*». É o princípio da simplicidade, um dos faróis que têm orientado os cientistas, mas cuja veracidade é discutível.

A segunda regra é uma forma de exprimir o princípio da causalidade, hoje em dia também questionado.

A terceira regra é uma regra de extrapolação e constitui o fundamento filosófico da grande síntese newtoniana.

Finalmente, a quarta regra é a apologia da indução experimental em desfavor das hipóteses sem fundamento empírico.

(34) Com a célebre *experiência do balde* (Kittel, Knight e Ruderman, 1973, pp. 61 e 62) **Newton** procurou discutir, de modo bastante sugestivo, a questão da aceleração absoluta ou relativa de uma partícula em relação ao referencial das estrelas fixas. A questão pode colocar-se nos seguintes termos: Existe alguma diferença entre *uma situação* em que uma partícula é acelerada, com uma aceleração $\vec{a}$, em relação ao referencial das estrelas fixas, e *outra situação* em que a partícula fica em repouso e é o referencial das estrelas fixas que possui a aceleração - $\vec{a}$?

Se a aceleração da partícula em relação às estrelas fixas for relativa, não há qualquer diferença entre as duas situações. Se a aceleração da partícula em relação às estrelas fixas for absoluta, há diferença entre as duas situações.

Consideremos, então, um balde com água posto a rodar num determinado sentido. A experiência mostra que a superfície livre da água assume a forma parabolóide. Pergunta-se: se o balde estivesse parado e fossem as estrelas fixas a rodar em sentido oposto com uma velocidade angular de igual medida, qual seria a forma da superfície livre do balde: a mesma forma parabolóide, ou uma forma plana como na primeira situação?

A experiência é conceptual e a questão não tem ainda qualquer resposta definitiva. Newton acreditava no espaço absoluto e no movimento absoluto e considerava o referencial das estrelas fixas como um referencial relativo, mas praticamente em repouso em relação ao espaço absoluto (ainda hoje, com observações cuidadosas ao longo de 100 anos, é impossível os instrumentos detectarem uma aceleração de uma estrela distante, dado que ela é inferior a $0,0001 \text{ cm/s}^2$). Consequentemente, Newton estava convencido que, caso a experiência se pudesse realizar, a superfície da água ficaria plana, porque considerava praticamente absoluta a aceleração de um corpo em relação ao referencial das estrelas fixas.

Mach, era de opinião contrária. Não acreditava no espaço absoluto, e portanto em acelerações absolutas, e entendia que *unicamente a aceleração relativa às estrelas fixas tem qualquer significado* (Princípio de Mach).

(35) Após o iluminismo e o triunfo da Mecânica Racional, mais propriamente no século passado, a Natureza passou a ser encarada como possuindo as seguintes características:

- rege-se por grandes princípios como o da causalidade, o da não contradição, os grandes princípios de conservação, etc.;
- tem uma estrutura dinâmica, mas consistente, de tal modo que o conhecimento das suas leis e das condições dos seus constituintes num dado momento (posições e quantidades de movimento) nos permite prever a sua futura evolução (determinismo clássico);
- tem uma evolução autónoma, isto é, não necessitando de Deus para compreender essa evolução;
- tudo o que nele sucede não é aleatório, antes comandado pelas leis da Física, não dando lugar ao livre arbítrio; a aparente liberdade de alguns dos seus constituintes deve-se ao desconhecimento das variáveis que intervêm na sua evolução;
- é, portanto, abarcável pelo quadro conceptual das ciências físicas (reducionismo fisicista).

(36) Kant sentiu-se confrontado com três interpretações irreconciliáveis do poder da razão humana:

- uma *posição dogmático-racionalista* segundo a qual, com a razão humana e apenas com ela, era possível conhecer o mundo;
- uma *posição céptico-empirista* que não acreditava minimamente no poder do conhecimento racional, e pretendia reduzir todo o conhecimento a uma manipulação de dados empíricos;
- uma *posição místico-irracionalista*, com uma valorização excessiva do poder do sentimento e da fé mística, em detrimento do poder da razão humana.

A existência destas três posições irreconciliáveis levou Kant à necessidade de proceder a uma *crítica da razão pura*.

Por *razão pura*, no sentido kantiano, poderemos entender a faculdade que a razão humana tem de estabelecer, a partir de si própria, e sem se basear na experiência:

- os grandes princípios que regem o conhecimento da Natureza;
- as leis que regulam o comportamento moral do homem livre;
- os seus grandes objectivos e as condições em que podem ser alcançados.

(Cordon e Martinez, 1984, p. 154)

Só através da crítica da razão pura, Kant acha possível estabelecer o que ele chamava uma "ciência genuína", uma ciência cuja certeza é apodíctica. E uma teoria racional da Natureza só se podia considerar científica se as leis da Natureza, que lhes estão subjacentes, fossem conhecidas *a priori*, e não fossem simples leis da experiência (é por isso que a Química não era para Kant uma ciência, mas antes o que ele chamava uma "arte sistemática").

E no prefácio dos «*Princípios Metafísicos da Ciência da Natureza*» escreve:

"Toda a ciência natural genuína precisa, pois, de uma parte pura, na qual se deve fundar a certeza apodíctica, que a razão nela busca. (...) Por conseguinte, a genuína ciência natural pressupõe uma metafísica da Natureza. Esta deve, pois, conter sempre princípios puros, que não são empíricos (é por isso que leva o nome de metafísica)" (1990, p. 15).

As condições que, segundo Kant, tornam possível a Ciência são de dois tipos:

- *condições empíricas*, particulares, que têm a ver com os factos, modificáveis com estes, como é o caso das condições experimentais com que observamos um cometa ou um micróbio (com binóculos ou com telescópio no primeiro caso, com microscópio no segundo);
- *condições a priori*, gerais e absolutamente necessárias, afectando à partida toda e qualquer investigação, como é o caso do local do espaço e do instante de tempo na observação (quem poderá ver um cometa ou um micróbio noutra local ou noutra instante em que não aparece?).

As condições *a priori* não são determinadas pela experiência, antes condicionam toda e qualquer experiência. São condições transcendentais.

(37) O *entendimento*, uma das duas formas de conhecimento, é activo e produz aprioristicamente as *categorias* (como substância, causa, totalidade, unidade, etc.).

Através da outra forma de conhecimento, a *sensibilidade*, vamos passivamente recebendo as impressões do mundo exterior com que vamos «enchendo» ou «colorindo» esses conceitos. Estes conceitos que o entendimento possui sem os derivar da experiência são por ele utilizados para conhecer os objectos de que temos percepção sensorial, e não podem ser utilizados para produzir afirmações acerca daquilo de que não temos percepção sensível (não podemos aplicar a categoria substância a Deus, por exemplo, porque Dele não temos qualquer percepção sensível).

(38) A Ciência produz juízos acerca do mundo físico.

Kant procedeu a uma análise do tipo de juízos que a Ciência pode produzir e classificou-os segundo dois critérios, tal como se mostra no quadro da página seguinte.

Classificações dos juízos segundo Kant

1ª- Segundo o *critério da inclusão do predicado* (qualidade) *na própria definição do sujeito* :

- **Juízos analíticos** - o predicado está incluído no sujeito, explícita ou implicitamente; não ampliam o conhecimento que se tem acerca do sujeito, isto é, não são extensivos (correspondem às verdades de razão de Leibnitz).

Exemplos:

- O homem tem um cérebro (se é homem, tem de ter cérebro).
- O triângulo tem três ângulos
- **Juízos sintéticos** - o predicado não está incluído no sujeito, nem explícita nem implicitamente; ampliam o conhecimento que se tem acerca do sujeito, isto é, são extensivos (correspondem às verdades de facto de Leibnitz).

Exemplos:

- O homem tem mais água que qualquer outra substância.
- Todos os macondes adultos têm mais de 1,60 m .

2ª- Segundo o *critério da dependência ou independência da experiência*:

- **Juízos *a priori*** - a verdade conhece-se independentemente da experiência; são universais e necessários.

Exemplos:

- O homem raciocina.
- O todo é maior que as partes.
- **Juízos *a posteriori*** - a verdade só é conhecida através da experiência; não são universais nem necessários.

Exemplos:

- O homem tem mais água que qualquer outra substância.
- Todos os cisnes são brancos.

(39) A secção V da Introdução à «*Crítica da Razão Pura*» tem como título o seguinte: “*em todas as ciências teóricas da razão encontram-se, como princípios, juízos sintéticos a priori.*” (1994, p. 46). E na mesma secção escreve (p. 48):

“A Ciência da Natureza (physica) contém em si, como princípios, juízos sintéticos a priori. Limitar-me-ei a tomar, como exemplo, as duas proposições seguintes: em todas as modificações do mundo corpóreo a quantidade de matéria permanece constante; ou: em toda a transmissão do movimento, a acção e a reacção têm de ser sempre iguais uma à outra. Em ambas as proposições é patente não só a necessidade, portanto a sua origem a priori, mas também que são proposições sintéticas. Pois no conceito de matéria não penso a permanência, penso apenas a sua presença no espaço que preenche. Ultrapasso, assim, o conceito de matéria para lhe acrescentar algo a priori que não pensei nele. A proposição não é, pois analítica, mas sintética e, não obstante, pensada a priori; o mesmo se verifica nas restantes proposições da parte pura da Física.”

Para Kant a “*ciência genuína*” tinha que ser matematizada. Por isso, como já dissemos, a Química da época não era considerada por ele uma ciência. Assim, “*uma ciência genuína, nomeadamente da Natureza, exige uma parte pura que subjaz à parte empírica, e que se baseia no conhecimento a priori das coisas da Natureza*” (1990, p. 16). E criticava os filósofos da Natureza (referia-se principalmente a Newton, que considerava o maior de todos) por postularem princípios simplesmente empíricos sem investigar as suas fontes *a priori* (1990, p. 18). E, entre outros objectivos, Kant procurava fundamentar, racional e aprioristicamente, os princípios empíricos da Mecânica ao escrever os «*Princípios Metafísicos da Ciência da Natureza*», objectivo esse de forma alguma cumprido.

Kant critica os conceitos de espaço e tempo na primeira parte da «*Crítica da Razão Pura*»: Estética transcendental.

E acerca do primeiro escreve (1994, p. 64):

“O espaço é uma representação necessária, a priori, que fundamenta todas as intuições externas. Não se pode nunca ter uma representação de que não haja espaço, embora se possa perfeitamente pensar que não haja objectos alguns no espaço. Consideramos, por conseguinte, o espaço a condição de possibilidade dos fenómenos, não uma determinação que dependa deles; é uma representação, a priori, que fundamenta necessariamente todos os fenómenos externos”.

E acrescenta, seis páginas à frente, como consequência da crítica ao espaço:

“Nada do que é intuído no espaço é uma coisa em si” e “os chamados objectos exteriores são apenas simples representações da nossa sensibilidade, cuja forma é o espaço mas cujo verdadeiro correlato, isto é a coisa em si, não é nem pode ser conhecida por seu intermédio; de resto jamais se pergunta por ele na experiência”.

(40) Hesse está a pensar, possivelmente, que o matemático trabalha com objectos ideais, conceitos, autênticas construções da mente humana, tais como pontos, rectas, quadrados, esferas, etc., enquanto que o físico, quando experimenta, utiliza objectos reais como aparelhos de medida, átomos, fios condutores, bolas, etc. Mas qual é, do ponto de vista epistemológico, a realidade desses objectos com que o físico trabalha? Não é uma realidade em que o experimentador intervém de modo decisivo? Não será ele que, de certo modo, também está a modificar essa realidade? Não é verdade que o físico, ao fazer experiências, também trabalha com «objectos» absolutamente ideais, autênticas construções da mente humana, como a densidade, a pressão, o volume, a temperatura, a energia, o sistema isolado, etc.? Não está a Física Moderna impregnada de autênticos objectos matemáticos como o campo electromagnético, o espaço de fase, o tensor momento-energia, a função de onda, etc.? Mesmo que se considere que alguns desses conceitos são abstraídos de corpos reais, o conhecimento desses corpos está intrinsecamente dependente do sujeito que o constrói, é uma criação humana, é feito de ideias e medições onde a actividade do sujeito desempenha um papel inalienável e é, tal como a Matemática, uma criação livre do espírito humano.

Ambas, Física e Matemática, têm contribuído, à sua maneira, para o conhecimento não especular do mundo físico.

(41) Um exemplo célebre é o de Einstein, que lamentou ter introduzido uma constante cosmológica *ad hoc* na equação da Relatividade Geral para obter uma solução correspondente a um Universo estático, por ter o preconceito que o Universo devia encontrar-se nesse estado.

(42) No século XVII existiam duas *teorias opostas* acerca da natureza da luz:

- a *teoria ondulatória*, de Robert Hooke e Christian Huygens, segundo a qual a luz era constituída por ondas, propagando-se num hipotético meio chamado «*éter luminífero*».
- a *teoria corpuscular* de Newton, de acordo com a qual a luz era formada por minúsculos corpúsculos.

Newton aceitava também a existência de um éter, não como um meio necessário à propagação da luz, mas, sim, como um meio que interactuava com os corpúsculos de luz (Ron, 1983, p. 21).

As duas teorias *confrontavam-se*, ambas interpretavam a seu modo os fenómenos luminosos então conhecidos e ambas tinham os seus pontos fortes e fracos, mas havia algo que nenhuma delas explicava: qual é a natureza do éter?

No século XVIII, mais especificamente em 1728, James Bradley, professor de Astronomia em Oxford, descobriu e estudou o fenómeno de *aberração das estrelas*. Observou que as estrelas, num referencial ligado à Terra, se moviam em trajectórias circulares com um diâmetro angular de cerca de 41 segundos de arco.

A aberração estelar era um forte apoio à teoria corpuscular da luz. Era *a experiência a apoiar a teoria*. E porquê? Porque, com a lei da composição de velocidades de Galileu, tornava-se possível explicar não só a aberração das estrelas como prever o valor que Bradley tinha descoberto. Com efeito, basta determinar a velocidade da luz em relação à Terra de acordo com a lei da adição de velocidades da Mecânica Clássica (essa velocidade é a diferença vectorial entre a velocidade da luz no éter, 300 000 km/s, e a velocidade da Terra no éter, 30 km/s), aplicar o teorema dos senos e ter em conta que para ângulos pequenos o seno é praticamente igual à tangente. Obtém-se imediatamente o valor observado de 41 segundos de arco para diâmetro angular da trajectória das estrelas.

Mas, nos primeiros anos do século passado, Thomas Young (1773-1829) realizou uma série de conferências posteriormente publicadas na sua obra «*Course of Lectures on Natural Philosophy*» (1807), onde apresentou e fez a análise das suas famosas experiências de interferência da luz proveniente de fendas (a este respeito pode-se consultar, por exemplo, a obra *Great Experiments in Physics*, Edit. by Morris H. Shamos, Dover Publications, 1987, pp. 93 a 107). Esses trabalhos experimentais e respectiva análise, feita por Young revelaram-se decisivos a favor da teoria ondulatória da luz, isto é, fortaleceram a ideia de que a luz é constituída por ondas a propagar-se num meio que vibra: o «éter luminífero».

Ora, do mesmo modo que a água, ao ser arrastada pelo vento, faz com que a velocidade das ondas marítimas seja afectada, também o éter, ao ser arrastado pela Terra, deveria modificar a velocidade das ondas luminosas no éter. Este facto deveria afectar as rigorosas observações da aberração das estrelas. Mas *as observações astronómicas da aberração das estrelas não confirmavam tal suposição teórica*. O éter comportava-se como não sendo arrastado pela Terra e este era o convencimento de Young que escrevia nas *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* o seguinte:

“Ao considerar o fenómeno da aberração das estrelas estou disposto a crer que o éter luminífero impregna a substância de todos os corpos materiais com resistência pequena ou nula”.

Mesmo após os trabalhos de Young, físicos notáveis, como Laplace, Herschel, Arago e outros, continuavam a utilizar o modelo corpuscular da luz, só porque acreditavam nele. Era o *estigma do mecanicismo newtoniano* a fazer sentir a sua força. E se um corpo material não arrasta o éter, então a velocidade dos corpúsculos de luz em relação a um corpo transparente qualquer deverá variar com a velocidade do corpo.

Arago chegou, então, à *conclusão teórica* de que a aberração das estrelas, vista através de um corpo de vidro, deveria ser diferente quando esse corpo fosse arrastado pela Terra no sentido do afastamento das estrelas ou no sentido da aproximação das estrelas. E, entre 1808 e 1809, Arago passou a *sujeitar a hipótese ao veredicto das experiências*. O resultado foi negativo: *as experiências não confirmaram a previsão teórica*.

É mais ou menos por esta altura que intervém Augustin Fresnel (1788-1827). Para interpretar o resultado negativo das experiências de Arago, e, simultaneamente, para dar conta do fenómeno da aberração das estrelas, Fresnel elaborou uma *explicação teórica* com base nas seguintes *hipóteses*:

- a «densidade etérea» de um corpo é proporcional ao quadrado do seu índice de refração, n^2 ;
- quando um corpo está em movimento transporta dentro de si apenas parte do éter (hipótese do *arrastamento parcial do éter*);
- é transportada a parte que constitui o excesso da sua densidade com respeito à densidade do éter no vazio (Ron, 1983, p. 24).

E a partir destas hipóteses *deduziu teoricamente* um coeficiente que ficou conhecido como coeficiente de arrastamento de Fresnel:

$$k = 1 - 1/n^2$$

Observe-se que, no caso do vazio e praticamente do ar, em que $n = 1$, o coeficiente de arrastamento é nulo. Não havendo arrastamento nesse caso, *a atmosfera terrestre não deveria arrastar o éter* e não deveria haver qualquer desvio, por esse facto, na observação da aberração das estrelas.

O físico inglês C. G. Stokes, em 1845, apresentou uma outra teoria, diferente da de Fresnel, em que previa, ao contrário de Fresnel, que *a Terra deveria arrastar o éter*, por atrito, isto é, do mesmo modo que as camadas de um fluido são arrastadas quando um corpo passa através dele. E admitindo, além disso, a hipótese da irrotacionalidade do éter, conseguiu pôr a sua teoria de acordo com as observações experimentais.

A teoria de Fresnel permitia fazer a seguinte *previsão experimental*:

Consideremos água em equilíbrio hidrostático num tubo, tudo em repouso relativamente ao referencial do éter em repouso (era para os físicos do século passado a «materialização» do referencial absoluto newtoniano, ou referencial em repouso absoluto).

A velocidade da luz nessa água em repouso é c/n (c = velocidade da luz no vácuo).

Vamos agora supor que a água é obrigada a mover-se no tubo com uma velocidade v .

Se a água arrastasse consigo totalmente o éter, a medida no laboratório da velocidade da luz, movendo-se no sentido da água, deveria corresponder à soma

$$c/n + v.$$

E a medida laboratorial da velocidade da luz, movendo-se no sentido contrário ao da água, deveria corresponder à diferença

$$c/n - v.$$

Admitindo, com Fresnel, que o éter (o meio de suporte da luz) e, portanto a luz, é apenas parcialmente arrastada, prevê-se que a velocidade da luz medida com a água em movimento deve ser:

$$\begin{aligned} c/n + k v, & \quad \text{quando a luz se move no sentido do fluxo de água;} \\ c/n - k v, & \quad \text{quando a luz se move em sentido oposto ao do fluxo de água} \end{aligned}$$

Em 1851, Fizeau realizou a sua célebre experiência da interferência nos tubos de água para *sujeitar ao veredicto da experiência a teoria* do arrastamento de Fresnel. *As medições de Fizeau confirmaram a previsão da teoria de Fresnel.*

A experiência foi repetida por Michelson e Morley em 1886 e por Zeeman e outros físicos posteriormente. Todos confirmaram as previsões de acordo com o coeficiente de arrastamento de Fresnel.

A partir de então, o coeficiente de arrastamento de Fresnel tinha de ser interpretado por qualquer teoria com a pretensão de ser aceite a respeito da luz, nem que tal teoria negasse qualquer arrastamento do éter! Foi o que aconteceu com a Teoria da Relatividade Restrita, de Einstein, que interpretou esse estranho coeficiente como consequência da adição de velocidades com base nas transformações de Lorentz, sem qualquer necessidade de supor a existência de um éter e muito menos do seu arrastamento.

Vimos que não devia haver arrastamento do éter pela atmosfera terrestre ($k = 0$). Então, com base na regra de composição de velocidades de Galileu, tornava-se possível fazer a seguinte *previsão teórica*: um feixe de luz leva *mais tempo* a percorrer a mesma distância, por exemplo de um ponto a um espelho e regresso do espelho ao mesmo ponto (após reflexão), quando viaja *na direcção da translação da Terra, do que quando viaja numa direcção perpendicular à da translação da Terra.*

O físico norte-americano A. Michelson forneceu-nos mais um exemplo em como a razão pode dirigir, e bem, a experimentação. Ele concebeu a célebre experiência de Michelson e Morley, que depois viria a ser repetida mais de 10 vezes por vários físicos (Resnick, 1971, p. 29) e sempre com o mesmo resultado: a velocidade da luz do Sol e das restantes estrelas é a mesma quando a luz caminha na direcção do movimento da Terra e numa direcção perpendicular ao movimento da Terra.

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) esforçou-se por fundamentar uma hipótese feita por Fitzgerald segundo a qual uma haste que se move na direcção da Terra se contrai por um determinado factor (o factor de Lorentz). Admitindo a contracção das hastes longitudinais dos interferómetros com que Michelson e Morley realizaram as experiências de acordo com o factor de contracção de Lorentz, o tempo que a luz levaria na ida ao espelho e regresso seria o mesmo na direcção da Terra e na direcção perpendicular (em que não se admitia qualquer contracção). Era, uma vez mais, a teoria a andar a reboque da experiência. Só que a teoria que Lorentz formulou era por demais complexa, exigia várias hipóteses *ad hoc* e, mesmo a versão mais acabada da mesma, publicada em 1904 (Lorentz, 1972, pp. 13-43), era muito insatisfatória, porque Lorentz continuava a privilegiar o referencial em repouso no éter como referencial absoluto.

Um ano depois, Einstein provava à evidência, e uma vez mais, que a Física **é muito mais do que uma ciência experimental**, ao oferecer-nos uma das mais belas «criações da mente humana». Partindo de duas hipóteses apenas, os célebres princípios da relatividade e da constância da velocidade da luz, a mente de Einstein construiu um encadeamento lógico de conceitos, revelando não só uma coerência interna exemplar como uma coerência no que refere à ligação ao mundo dos sentidos.

Muitos outros exemplos poderiam ser apresentados para fundamentar a tese de que a teoria e a experiência estão inter-relacionadas de modo dialéctico. Voltaremos a este tema a propósito do problema da metodologia científica.

(43) Sabe-se, por exemplo, que uma região do cérebro, a circunvolução frontal ascendente, é importante nos movimentos voluntários.

Outra região, a circunvolução parietal ascendente, está adstrita à consciencialização das impressões sensitivas.

Outra ainda, nas margens da cissura calcarina, constitui o centro cortical da visão, pois recolhe os estímulos transmitidos pela retina.

O sistema límbico está envolvido no comportamento emocional.

O neocórtex, a parte maior e evolutivamente mais recente do córtex cerebral é fundamental para o pensamento e a percepção.

Porém, os mecanismos da mente, devido à sua complexidade, são ainda em grande parte desconhecidos. Há hoje fortes indícios de que os mecanismos que regulam as emoções e os sentimentos, estão internamente relacionados com os mecanismos que regulam, por exemplo, a compreensão, a personalidade, as tomadas de decisão (Damásio, 1995).

(44) Baseando-nos em alguns livros e artigos de revistas (por exemplo, a «*Scientific American, Special Issue*» de Setembro de 1992, e a «*Sciences et Avenir, Hors-Série*», de Junho/Julho de 1994) podemos sintetizar alguns **princípios de funcionamento do cérebro**:

1º - Os *neurónios* do cérebro são células polarizadas que recebem sinais que transportam informação em extensões altamente ramificadas dos seus corpos - as chamadas *dendrites*, e enviam a informação através de extensões não ramificadas - os *axónios*.

2º- Os neurónios diferem quanto à forma e composição molecular, podem ter axónios curtos, comunicando com outros neurónios próximos, ou axónios longos, projectando-se para zonas mais afastadas.

3º - Os neurónios formam uma rede descontínua, modificável. Os axónios espalham-se por novos terminais quando as células vizinhas deixam de funcionar. Os ramos terminais dos canais dendríticos são constantemente alterados.

4º - Todas as células têm o mesmo conjunto de genes. Porém, cada célula activa apenas um pequeno subconjunto de genes.

5º - Neurónios com funções semelhantes estão agrupados em colunas que se estendem através da espessura do córtex cerebral. Há áreas determinadas que comandam determinadas funções.

6º - Todos os neurónios conduzem a informação do mesmo modo: a informação viaja ao longo dos axónios, com uma velocidade inferior a 100 m/s, sob a forma de breves impulsos eléctricos (*potenciais de acção*) que medem cerca de 100 mV e têm uma duração de cerca de 1 ms. Eles resultam do movimento de iões sódio electricamente positivos através da membrana celular, do fluido extracelular para o interior da célula.

8º - Os sistemas sensitivos estão dispostos de um modo hierárquico, isto é, os neurónios respondem a aspectos cada vez mais abstractos dos estímulos complexos quando a distância da fonte (medida em número de sinapses) cresce.

9º - Os diferentes aspectos de uma mesma percepção são processados em trajectos paralelos, isto é, a informação não se move ao longo de um único trajecto.

10º - As redes neuronais vão-se modificando com a aprendizagem, reagindo à informação proveniente do mundo exterior. A aprendizagem modifica a força das ligações entre os neurónios. Na base da memória está um aumento persistente na eficácia sináptica que se segue a períodos breves de estimulação (fenómeno da potenciação a longo termo). Esta modificação é um fenómeno individual e torna cada ser humano único no seu modo de apreender o significado do mundo exterior.

11º - O pensamento consciente, a percepção, o afecto, as emoções, os sentimentos estão relacionados com a actividade dos neurónios com base nos potenciais de acção.

(45) As soluções teológicas propõem-se resolver o problema filosófico da prioridade do sujeito ou do objecto no conhecimento, recorrendo a um princípio fundamental, básico, da realidade, com valor absoluto.

Se se considera que esse princípio absoluto imana do próprio mundo, que o sujeito e o objecto, o pensamento e o ser, a consciência e as coisas são uma *unidade*, são os dois aspectos de uma mesma realidade, está-se perante uma visão monista e panteísta, como, por exemplo, a defendida por Spinoza, Schelling e outros filósofos.

Se, pelo contrário, se considera que o princípio absoluto é transcendente ao mundo, há uma dualidade metafísica entre o pensamento e o ser, a consciência e as coisas, como produtos diferentes de uma Divindade, trata-se de uma visão dualista e teísta. Foi perfilhada, com variantes, por muitos filósofos, como Santo Agostinho, São Tomás de Aquino, Descartes, Leibnitz, e tantos outros.

Quando, partindo da análise do processo do conhecimento, se pretende aprofundar filosoficamente a discussão do problema da sua essência (cujas complexidades só passa despercebida a um pensador se estiver desatento), poder-se-á acabar por adoptar uma solução teológica, por crença, que não pelo raciocínio. O que achamos absolutamente descabido, hoje em dia, é repetir o erro de grandes pensadores que, partindo de posições metafísicas teístas, pretenderam chegar à resolução do problema da essência do conhecimento.

(46) Podemos dizer que os nominalistas se opõem ao platonismo e ao tomismo no que toca à realidade dos conceitos universais.

Com efeito, segundo Platão, os conceitos ou essências universais têm existência extra-mental. O Demiurgo modelou essas essências na matéria com perfeição. Os quatro elementos primordiais estruturaram-se geometricamente na forma de sólidos regulares (fogo = tetraedro, ar = octaedro, água = icosaedro, terra = cubo) formando os corpos materiais. A matéria introduz, por assim dizer, um factor de corrompimento, de imperfeição, de indeterminação, razão porque o Universo não é perfeito.

Para conhecermos o mundo, devemos começar por cima, isto é, por conhecer o mundo das Ideias.

Ao contrário de Platão, São Tomás de Aquino, na linha de Aristóteles, pensava que o conhecimento do mundo deve começar por baixo, a partir do mundo sensível. É a partir deste que, por abstracção, atingimos a universalidade dos conceitos. Mas, para São Tomás, os seres da mesma espécie têm uma mesma essência e não essências apenas semelhantes. Essa essência comum é uma realidade que faz parte integrante de cada indivíduo e não um simples nome como pensam os nominalistas.

Em termos exemplificativos, para São Tomás a gata Bébé tem a essência que é comum a todas as gatas, além dos seus elementos peculiares. Para os nominalistas, a gata Bébé tem a sua própria essência que difere das essências de todas as outras gatas e gatos, embora essas essências apresentem semelhanças que nos permitem formular os conceitos de gata e gato.

(47) A este respeito, Politzer (1975, p. 145) afirma o seguinte:

“O materialismo pré-marxista não tinha a consciência desta concepção da acção do homem. Pensava-se, nessa época, que era um produto do meio, enquanto que Marx nos ensina que o meio é um produto do homem”.

(48) São as seguintes as **leis do materialismo dialéctico**, cujo principal teórico se pode considerar Friedrich **Engels**:

1ª - *Lei da mudança universal*:

No Universo nada é definitivo, tudo muda e evolui por força de um autodinamismo subjacente aos seres.

2ª - *Lei da acção recíproca*:

No Universo tudo influi com tudo, de tal modo que a evolução de um ser depende da evolução dos outros.

3ª - *Lei da contradição*:

Os objectos naturais mudam porque encerram em si contradições subjacentes, vão-se realizando neles sínteses de tendências contrárias.

4ª - *Lei da mudança qualitativa*:

A evolução do Universo ocorre por saltos qualitativos (Engels formulou-a nos seguintes termos: «*em certos graus de mudança quantitativa, produz-se subitamente uma mudança qualitativa*»).

(49) O filósofo materialista **Politzer** refere o exemplo da semente. A semente origina a árvore, a árvore origina a flor, a flor dá o fruto, o fruto amadurece, a Terra atrai a árvore e o fruto, o fruto cai da árvore e dá sementes à terra, as sementes dão outras árvores, as outras árvores dão outros frutos, estes voltam a cair, e o processo de mudança e desenvolvimento continua em espiral (Politzer, 1975, p. 200).

(50) São de Einstein as seguintes palavras (1981, pp. 48 e 49):

“Hoje toda a gente sabe, evidentemente, que os famosos conhecimentos nada têm de certo, nada de intimamente necessário, como Kant acreditava. Mas Kant colocou o problema sob o ângulo desta constatação. Temos um certo direito de pensar conceitos que a matéria experimental sensível não pode dar-nos, se permanecermos no plano lógico em face do mundo dos objectos.

Penso que é preciso ainda superar esta posição. Os conceitos que aparecem no nosso pensamento e nas nossas expressões linguísticas são - do ponto de vista lógico - puras criações do espírito e não podem provir indutivamente de experiências sensíveis. Isto não é tão simples de admitir porque unimos conceitos certos e ligações conceptuais (proposições) com as experiências sensíveis, tão profundamente habituais, que perdemos a consciência do abismo logicamente insuperável entre o mundo do sensível e o do conceptual e hipotético.

Por isso, incontestavelmente, a série de números inteiros marca uma invenção do espírito humano, um instrumento criado por ele para facilitar e ordenar algumas experiências sensíveis. Não existe possibilidade alguma de tirar este conceito da própria experiência sensível. (...) Mas quanto mais nos aproximamos dos conceitos elementares na vida quotidiana, tanto mais o peso de hábitos arreigados nos embaraça para reconhecermos o conceito como criação original do espírito. Assim se elaborou uma concepção fatal e gravemente errónea para a compreensão das relações reais e imediatas: os conceitos constituem-se a partir da experiência e, em seguida, da abstracção, mas com isto perdem uma parte do seu conteúdo.”

(51) Os primeiros trabalhos de Sociologia da Ciência encaixavam perfeitamente nas ideias neopositivistas e, até, de certo modo, tentavam complementar essas ideias. (Giere, 1988, p. 29).

(52) Há uma *incomensurabilidade linguística*, na medida em que a mesma palavra possui significados diferentes em diferentes teorias (Kuhn refere, como exemplo, a palavra massa que tem significados diferentes na teoria newtoniana e einsteiniana). Há também uma *incomensurabilidade de padrões*, já que existem determinadas normas desenvolvidas contextualmente na comunidade científica e que variam de teoria para teoria. Dessas normas depende directamente toda uma tradição de pesquisa e, indirectamente, as respostas a questões importantes do tipo: O que é um problema com significado? O que é uma solução aceitável?

(53) Os **empiristas lógicos** distinguem dois tipos de termos científicos:

- os *termos observacionais* que se referem a aspectos do mundo real;
- os *termos teóricos* que derivam o seu significado das ligações lógicas entre si e das ligações com os termos observacionais.

(54) A *Escola de Edimburgo* foi formada, nos finais dos anos 60, por David Edge, incluindo historiadores e sociologistas da Ciência tais como Barry Barnes, David Bloor, Stephen Shapin e Donald MacKenzie.

(55) Segundo afirma o cientista americano Novak, nos Estados Unidos da América há ainda hoje um nicho cultural onde permanece a ideia de que a Terra é plana (1992, p. 3.29).

(56) Esta atitude de englobar no «mesmo saco» objectos materiais e ideias, colocar a par as paredes de aço do motor de automóvel e a energia, pode parecer absurda e conduzir-nos a um esoterismo. Este, aliás, tem-se acentuado cada vez mais à medida que se avança na Física actual, onde, a determinada altura, a abstracção é tal que as componentes tangíveis quase se escondem por completo.

Não significa, obviamente, que não distingamos as paredes de um motor da energia que nele intervém. O que se afirma é que, quer os materiais do motor, que vemos e tocamos, quer a energia, que não vemos nem tocamos, são «coisas» que intervêm na compreensão dos fenómenos que ocorrem no motor. Estes fenómenos, sem a energia, tornavam-se incompreensíveis...

Do mesmo modo, quem entenderia os fenómenos electromagnéticos sem o conceito de campo electromagnético? O que é este? Um fluido? O éter?

Já nenhum físico acredita nisso. Tudo o que se pode dizer é que é um ente abstracto definido por equações matemáticas - as equações de Maxwell. Mas, sem essa «coisa», compreenderíamos tão bem a atracção ente dois ímanes como o lendário pastor Magnes compreendia a atracção da ponta de ferro do seu cajado para o monte com magnetite. E ainda comunicaríamos uns com os outros do mesmo modo que no seu tempo!

Concluimos com a seguinte analogia, que compensa em clareza o que perde em rigor: os fenómenos físicos são «objectos» da Física do mesmo modo que uma entrevista poderá ser um objecto da Psicologia. O psicólogo estuda a entrevista sem se aperceber que no seu estudo intervêm, além de pessoas, gravadores de som e de imagem, ondas sonoras, radiações electromagnéticas, frases, palavras, gestos, signos, etc; uma complexidade de entidades que de uma forma interactiva contribuem para que a entrevista seja um facto real. Também não são *apenas* coisas tangíveis que conferem realidade à entrevista.

(57) O **fenomenalismo kantiano**, sendo também uma síntese entre o idealismo e o realismo, não pode no entanto ser aceite hoje em dia. Ele assenta, como vimos, na existência de categorias *a priori* e numa visão espaço-temporal do mundo real hoje inaceitável.

O espaço e o tempo não são, como pensava Kant, conceitos *a priori*, não estão dissociados do mundo dos fenómenos, não são aquele palco que Newton idealizou, que está para além dos corpos, e de que temos apenas um conhecimento intuitivo, extra-sensorial, *a priori*. Sem os corpos e os fenómenos em que intervêm, sem o devir universal, não haveria espaço e tempo. O espaço-tempo é indissociável de cada referencial físico e cada referencial físico está ligado a um corpo. E, como Kant baseava o seu apriorismo e o seu criticismo na existência do espaço e tempo como intuições puras (no sentido de desligadas da experiência), a sua doutrina perde alguma validade.

E quando dizemos que a doutrina kantiana perde alguma validade é porque, como diz Heisenberg (1971, p. 173) "*o a priori kantiano não deixa de existir na nova Física, mas é, por assim dizer, relatividade. Os conceitos da Física Clássica, quer dizer, também os conceitos de espaço, tempo e causalidade, são, neste sentido, a priori na teoria da relatividade e na teoria quântica, porque têm de empregar-se na descrição das experiências ou, exprimindo-nos com mais cuidado, porque de facto se utilizam. Mas o seu conteúdo é modificado nestas novas teorias.*"

(58) A **fenomenologia de Husserl** também não pode aceitar-se pois é transcendental, exige um *ego* puro, capaz de produzir conteúdos da consciência não «poluídos» pelos sentidos. Onde existe um ser cognoscente capaz de apreender os dados na sua pureza, sem a deformação provocada pelos sentidos? Tal como outros filósofos afirmaram (Heidegger, por exemplo), o que existe não são sujeitos puros, capazes de uma subjectividade não poluída. O que existe são sujeitos no mundo, em interacção com ele.

(59) Os conhecimentos acerca das filosofias de Hegel, de Engels, da teoria de Darwin da evolução das espécies, do significado e do modo como se estabeleceram diversas leis da Física, da história da evolução de diversos conceitos, aliados à leitura de trabalhos de vários filósofos e cientistas (Radunskaia, 1974, Langevin, 1974, Caraça, 1975, Marquit, 1978, Caraça, 1978, Lefebvre, 1983, etc., etc.), bem como a reflexão que diversos trabalhos filosóficos de António Sérgio, Bachelard e outros nos proporcionaram levaram-nos a acreditar na evolução dialéctica do mundo e do pensamento.

Não vamos aqui desenvolver mais, por razões óbvias, a fundamentação da nossa visão epistemológica e ontológica do Universo. Limitamo-nos a transcrever e a apoiar uma citação de Pascal, que António Sérgio fez no prefácio do livro de Bertrand Russell, «*Os problemas da Filosofia*» (por ele traduzido, embora a sua posição filosófica seja

perfeitamente oposta à do atomismo lógico de Russel), e que vem a propósito referir neste momento:

"como todas as coisas são causadas e causantes, ajudadas e ajudantes, mediatas e imediatas, e como todas se acham entretecidas por um vínculo natural e insensível, que liga as mais afastadas e as mais diferentes, creio impossível conhecer as partes sem que se conheça também o todo, e não menos o conhecer-se o todo sem que se conheçam particularmente as partes"(1980)

As várias ciências investigam as diversas partes do todo para melhor conhecermos este. A filosofia faz reflexão sobre o todo, ou mesmo sobre as partes, mas numa perspectiva do todo, e, com isso, poderá contribuir para um melhor conhecimento das diversas parcelas do Universo.

Ao procurarmos isolar o Universo físico, e, não satisfeitos, ao dividir este em diversos sub-mundos - o da Biologia, o da Física, o da Química, etc., e, ainda não satisfeitos, ao compartimentarmos o mundo das altas energias, o mundo dos fenómenos moleculares, o mundo dos plasmas, etc, estamos a retalhar o Universo como quem retalha um animal desconhecido para ver como funciona o mais pequeno dos órgãos. Mas, o conhecimento do animal é muito mais do que o conhecimento parcelar dos seus órgãos, por mais minucioso que este seja, principalmente porque entre esses órgãos há veias sanguíneas que influenciam uns órgãos com os outros. Deixemos, pois, de ser meros «retalhistas», teimando em olhar só para um ou outro órgão do grande **"ser vivo universal"** em que vivemos, desprezando o seu todo.

(60) Esta ideia que temos vindo a referir será por nós defendida, de modo mais incisivo, quando tratarmos do próximo macroproblema, mais concretamente na secção 3.12 que se intitula assim: *«Há um isomorfismo entre a construção do conhecimento físico por cada indivíduo e a construção do conhecimento físico ao longo da história»*.

(61) É na era neolítica que se inventa a primeira escrita hieroglífica e se efectuam os primeiros cálculos simples. Os homens dessa época já estavam em pleno processo de construção do conhecimento que hoje possuímos. Foi vital para o desenvolvimento da Ciência a linguagem, escrita e oral, e o cálculo.

A revolução urbana marca o início da História mas não o início da Ciência: esta é tão velha como o homem!

Quando se começam a formar os primeiros agregados populacionais junto aos rios Tigre e Eufrates e no vale do Nilo, passa a haver uma produção rica e construção de conhecimento. É na riqueza, e não na miséria, que reside um dos factores de produção do conhecimento (hoje, mais do que nunca, temos bons testemunhos disso).

(62) Quando nos referimos a modelos geoestáticos e não geocêntricos, designação mais divulgada, estamos a distinguir o facto de os modelos em causa não terem exactamente a Terra no centro do Universo. A Terra está em repouso, mas fora do centro. É o caso do modelo de Filolau, um pitagórico, que, para explicar o facto de as pessoas de cabeça para baixo na Terra não caírem, imaginou a existência de uma anti-Terra (simétrica da Terra relativamente a um fogo central).

(63) Quando um grande pensador completa uma grande teoria, funda também uma «**escola**» e logo aparecem os seus discípulos a argumentar a favor da teoria do mestre. Aconteceu com Parménides e com Kant, com Newton e com Einstein. Um dos principais «argumentadores» a favor da teoria de Parménides foi **Zenão de Eleia**. Havia que negar a possibilidade do movimento porque o mestre afirmava que o movimento é uma ilusão dos sentidos. Pois Zenão inventou diversos **paradoxos** para nos convencer que o movimento é ilusório, o mais célebre dos quais é o «*paradoxo de Aquiles e da tartaruga*».

(64) Em termos pedagógicos, **Sócrates** introduziu a *maiêutica*, um processo de diálogo dialéctico com os alunos em que estes são conduzidos a atingir, por eles

próprios, os objectivos que se pretendem. *Este método pedagógico*, por motivos psicológicos que mais tarde tentaremos fundamentar, *está a readquirir importância ultimamente*.

Sócrates é também um exemplo da *dignidade de um pensador em defesa de uma causa* que a sua mente considera justa. Condenado à morte com a acusação injusta de corromper a juventude, foi-lhe concedida a hipótese de se redimir, mas recusou, morrendo “*ao serviço de Deus*”.

(65) Também em termos teológicos, os pensadores escolásticos têm divergências quanto ao papel da intuição: os platónico-agostinistas acreditavam que era possível ter uma intuição intelectual de Deus, enquanto que os aristotélico-tomistas entendiam que Deus tinha de ser demonstrado.

(66) A **Física aristotélica** baseia-se essencialmente nos seguintes princípios:

- O Universo é ordenado e tem dois sub-mundos: o mundo supra-lunar e o mundo sub-lunar.
- Todos os corpos do Universo são formados por elementos ou essências: os corpos terrestres por terra, água, ar e fogo e os celestes pelo éter ou quinta essência.
- Cada corpo tem o seu lugar natural e tende a ocupá-lo.
- Não existe o vazio na Natureza.

(67) O movimento, segundo Aristóteles, obedece a duas leis que, em termos actuais (antigamente os pensadores verbalizavam muito os raciocínios e, quando apresentavam formalismos matemáticos, eram fundamentalmente proporções), poderemos escrever do seguinte modo (Cohen, 1988, pp. 34 a 43):

- $F > R$

- $v \propto F / R$

Se existisse o vácuo, a resistência ao movimento seria nula e a velocidade de um móvel tornar-se-ia infinita.

Além disso, Aristóteles necessitava do princípio da inexistência do vácuo para explicar o facto de o movimento dos projecteis ser um movimento violento.

Convém notar que Aristóteles não se preocupava em explicar o movimento instantâneo a instantâneo, pois desinteressou-se pela fase de arranque do móvel em que ele atinge a velocidade v .

(68) A palavra **estoicismo** provém de *Stoa paikile* (pórtico ornado com as pinturas de Polignoto) de Atenas, local onde Zenão de Cítio, o seu fundador, começou a ensinar.

(69) Infelizmente, a Biblioteca de Alexandria viria a ser destruída conjuntamente com grande parte do seu recheio, sendo este um dos maiores crimes de lesa-cultura que a humanidade conheceu.

(70) Surgiu uma pequena divergência no que se refere às fontes históricas que consultámos. Segundo umas, Eratóstenes ter-se-ia baseado na distância já medida pelos soldados quando marchavam de Alexandria a Siena - aproximadamente 5000 estádios, pelo que concluiu que o perímetro da Terra era à volta de 250 000 estádios. Segundo outras fontes, ele próprio teria incumbido um homem de medir essa distância a passos, obtendo um valor em estádios próximo daquele. Tendo em conta que cada estádio corresponde aproximadamente a 180 m, obteve para o perímetro da Terra um valor próximo de 45 000 km, portanto para o raio da Terra cerca de 7000 km (actualmente sabe-se que esse valor é 6 400 km).

(71) Até ao século XIII o pensamento no Ocidente caracterizou-se por um predomínio da filosofia de inspiração platónica. O século XIII é aquele em que o Ocidente trava contacto com o aristotelismo por duas vias: a predominante, através da grande *síntese aristotélico-cristã de São Tomás de Aquino*; a via lateral e sinuosa, por meio do *averroísmo** (de Averróis, o maior comentador árabe das obras aristotélicas), que penetra na Universidade de Paris no séc. XIII.

A primeira via conduziu a um aristotelismo «impuro», porque adaptado a uma filosofia cristã; a segunda a um aristotelismo «puro», “*eliminado de todas as excrescências platónicas*” (Cordon e Martinez, 1985, p. 109) que proclama, entre outros princípios, o da eternidade do mundo.

(72) Concretamente, **Oresme** escreve as seguintes palavras (Kuhn, 1990, pp. 138-139):

*“Suponho que o movimento local só pode ser percebido quando um corpo altera a sua posição em relação a outro. Assim sendo, se um homem dentro de um barco **a**, que se move ora lenta ora rapidamente, só conseguirá ver um segundo barco **b**, que se move exactamente do mesmo modo que **a**, então direi que lhe parecerá que nenhum barco se mexeu. E se **a** está em repouso e se **b** se deslocar, parecer-lhe-á que **b** se mexe, e se for **a** que se desloca e **b** estiver em repouso ainda lhe parecerá que **a** está em repouso e **b** em movimento... Portanto, digo que, se a mais alta (ou celestial) das duas partes do universo acima mencionada, fosse hoje movida com um movimento diurno, como acontece enquanto a mais baixa (ou terrestre) permanecesse em repouso, e se amanhã, pelo contrário, a parte mais baixa se movesse diariamente enquanto a outra parte, isto é, o céu estivesse em repouso, não seríamos capazes de ver nenhuma alteração e tudo pareceria na mesma hoje e amanhã”*

Este tipo de argumentação e contra-argumentação que historicamente aconteceu, esta dialéctica histórica argumentação-contra-argumentação, foi um factor fundamental para o progresso do conhecimento científico.

(73) Tal como afirmam Cordon e Martinez (1984, p. 50), a unificação a que Copérnico acabou por chegar, com a elevação do mundo-sublunar à categoria celeste, tem claras raízes cristãs. O mundo criado por Deus não suporta uma tal distinção.

E quanto à heliolatria, basta lermos este pequeno texto de Copérnico:

“No meio de todos encontra-se o Sol. Ora quem haveria de colocar neste templo, belo entre os mais belos, um tal luzeiro em qualquer outro lugar melhor do que aquele donde ele pode alumiar todas as coisas ao mesmo tempo? Na verdade, não sem razão, foi ele chamado o farol do mundo por uns e por outros a sua mente, chegando alguns a chamar-lhe o seu governador. (Hermes) Trimegisto apelidou-o de Deus visível e Sófocles em Electra, o vigia universal. Realmente o Sol está como que sentado num trono real, governando a sua família de astros, que giram à volta dele.”

(Copérnico, 1984, pp. 52 e 53).

(74) **Galileu**, por exemplo, ao verificar com o telescópio que a paisagem da Lua é semelhante à das partes inóspitas da Terra, fez referência “à velha opinião pitagórica de que a Lua é como outra Terra” (Cohen, 1988, p. 86).

(75) São três as **tábuas de Bacon**:

- a *tábua de presenças*: onde se registam os casos em que a propriedade aparece;

- a *tábua de ausência*: onde se registam os casos em que a propriedade não aparece;

- a *tábua de graus*: onde se registam os casos em que a propriedade revela variação de graus.

Bacon acreditava no poder da Ciência como processo de domínio da Natureza. O ser humano, se descobrir as leis que regem os fenômenos naturais, pode utilizá-las em proveito próprio. Mas, para descobrir essas leis, há que não nos fiarmos no conhecimento sensorial intuitivo, imediato, já que existe toda uma gama de erros que se cometem quando se formulam juízos baseados apenas nos dados imediatos dos sentidos. Entendia que os preconceitos e os erros ofuscam o conhecimento. "*Cada homem possui uma caverna pessoal que distorce a luz da Natureza*" é o grande ditado baconiano.

(76) As «**principais regras do método**», de **Descartes**, vêm discriminadas na segunda parte do «*Discurso do Método*» (1988, pp. 72-73) que tem aquele título.

Depois de um discurso de umas seis páginas em que Descartes, no seu estilo, dá um sentido biográfico ao que escreve, ele acrescenta o seguinte:

“E, como o grande número das leis fornece, muitas vezes, desculpas aos vícios, de maneira que um Estado é muito melhor governado, quando, tendo pouquíssimas leis, elas são rigorosamente cumpridas, analogamente, em lugar daquele grande número de preceitos que constituem a lógica, julguei que me bastariam os quatro seguintes, desde que eu tomasse a firme e constante resolução de não deixar uma só vez de os cumprir.

O primeiro consistia em nunca aceitar coisa alguma por verdadeira, sem que a conhecesse evidentemente como tal, ou seja, evitar cuidadosamente a precipitação e a prevenção, e não incluir nada mais nos meus juízos senão o que se apresentasse tão claramente e tão distintamente ao meu espírito, que não tivesse nenhuma ocasião de o pôr em dúvida.

O segundo consistia em dividir cada uma das dificuldades que examinava em tantas parcelas quantas fosse possível e fosse necessário, para melhor as resolver.

O terceiro consistia em conduzir por ordem os meus pensamentos, começando pelos objectos mais simples e mais fáceis de conhecer, para subir, pouco a pouco, gradualmente, até ao conhecimento dos mais complexos, não deixando de supor certa ordem entre aqueles que não se sucedem naturalmente uns aos outros.

O último consistia em fazer sempre enumerações tão completas e revisões tão gerais, que tivesse a certeza de nada omitir”.

(77) Até agora falámos sempre em experiência, sem distinguir se ela é a experiência naturalmente adquirida no dia a dia ou se é uma experiência produzida artificialmente e em condições controladas.

A partir de Galileu é importante distinguir-se a *experiência* passiva como resultado da observação mais ou menos ingénua dos fenómenos que nos rodeiam, em que não há controlo dos factores intervenientes, e a experiência activa ou *experimentação* em que se recriam os fenómenos, se controlam os factores intervenientes, se quantificam variáveis, se matematiza.

(78) Cohen explica com muita clareza o processo que **Galileu** adoptou para **medir a altura das montanhas da Lua** (1988, p. 85). É mais um exemplo paradigmático da síntese entre a razão e a observação (com o telescópio neste caso) para resolver os problemas científicos e construir o conhecimento do mundo.

(79) Mais um pequeno exemplo ilustra toda esta **dialéctica entre raciocínio** (com ideias) **e experimentação** (com objectos):

Galileu afirmou que os «*graus de velocidade*» adquiridos pelo mesmo móvel sobre planos de inclinações diferentes e mesma altura são iguais. Este facto resultou de um raciocínio matemático baseado num teorema geométrico já conhecido de que o comprimento de uma corda tirada do cume de uma circunferência para um ponto desta é meio proporcional entre o diâmetro e a projecção da corda segundo o diâmetro.

Este facto de os corpos atingirem a mesma velocidade ao caírem da mesma altura vertical proporcionou a Galileu uma excelente «*imagem mensurável*» da velocidade: a

altura de queda (era-lhe fácil medir alturas e difícil medir velocidades instantâneas). O uso deste teorema matemático foi confirmado por Galileu numa carta a Baliani (Cohen, 1988, p. 128).

(80) Esse livro I, intitulado «*O movimento dos corpos*», começa por uma introdução onde, para além dos prefácios, constam oito definições fundamentais, um primeiro escólio, três leis do movimento com seis corolários e outro escólio.

As **oito definições** com que abre a obra são as seguintes, por ordem: a de quantidade de matéria ou massa, a de quantidade de movimento, a de inércia (*vis insita*), a de força, e a de força centrípeta (as quatro últimas). No primeiro **escólio** Newton define o **espaço absoluto**, o **tempo absoluto**, o **lugar** e o **movimento absoluto**. A seguir vêm as suas **três famosas leis**, dois **corolários** respeitantes à composição de forças, um corolário respeitante à composição de quantidades de movimento, um respeitante ao centro de gravidade, um outro onde consta o princípio da relatividade, outro que se refere à relatividade de dois movimentos paralelos. Finalmente, noutro **escólio**, fundamenta os princípios com base nos conhecimentos e na experiência do antecedente.

(81) Pelas descrições, incompletas, que **Newton** fez do trajecto que o conduziu à síntese entre a Física celeste e a Física terrestre, ele teria partido da terceira lei de Kepler, ou lei dos períodos. A partir desta lei e da lei fundamental ou segunda lei de Newton, $F = m \cdot a$, é fácil mostrar que a força que actua num planeta que descreve uma órbita circular é directamente proporcional à massa do planeta e inversamente proporcional ao raio da órbita (é, pois, inverso-quadrática). Já é mais difícil chegar a esta mesma conclusão para órbitas elípticas (a realidade dos planetas), mas Newton conseguiu construir a matemática necessária para chegar lá. Além disso, ainda mostrou que a força que actua num corpo é do mesmo tipo, isto é, inversamente proporcional ao quadrado da sua distância ao centro em torno do qual revoluciona, em qualquer trajectória que seja uma secção cónica (circunferência, elipse, parábola ou hipérbole).

Newton dispunha ainda de mais evidência experimental: as observações telescópicas dos satélites de Júpiter e de Saturno tinham mostrado que os movimentos desses satélites obedecem às leis de Kepler, mas as constantes de proporcionalidade entre o quadrado do período e o cubo do raio variam com o astro director (Sol, Júpiter ou Saturno).

Portanto a lei de força que actua nos astros que andam à volta de outro estava encontrada: igual a uma constante de proporcionalidade que depende do astro director, a multiplicar pela massa do astro que anda à volta e a dividir pelo quadrado da distância entre os astros.

A grande síntese começa quando Newton relaciona a força necessária para conservar a Lua na sua órbita com a força da gravidade à superfície da Terra. O astro central é o mesmo e eram conhecidas a distância da Lua à Terra e o raio desta. Da relação entre as forças obteve a relação entre as acelerações da gravidade à distância a que está a Lua e à superfície da Terra. Conhecida esta, imediatamente obteve a aceleração da Lua em torno da Terra. O valor desta aceleração foi um valor obtido teoricamente a partir de dados experimentais. Nesta dedução teórica utilizou a sua lei inverso-quadrática.

A seguir, conhecido o período e o raio orbital da Lua, Newton determinou a aceleração da Lua. Este é outro valor obtido teoricamente a partir de dados experimentais, mas nesta dedução teórica não usou a lei inverso-quadrática. E teve a confirmação do que já esperava encontrar: a coincidência dos dois valores da aceleração da gravidade da Lua, obtidos pelos dois processos. Conclusão: a força que mantém a Lua na sua órbita e a força da gravidade à superfície da Terra são da mesma natureza. Newton fez o que se poderá chamar uma *transdução* ou passagem ao universal (não só uma indução dentro dos sistemas em estudo): uma generalização da lei inverso-quadrática a todos os astros.

Finalmente, entrando em conta com outra hipótese mecânica - o princípio da igualdade da acção e da reacção, chegou finalmente à lei da atracção universal.

(82) A «**espada de Ockam**» tem sido utilizada sempre ao longo da história do conhecimento físico. **Copérnico**, por exemplo, utilizou-a quando construiu o seu modelo, que de um modo mais simples interpretava o mesmo que o complexo modelo de Ptolomeu. **Newton** utilizou-a também, várias vezes, por exemplo quando acreditou que a força exercida pela Terra na maçã fosse da mesma natureza que a exercida na Lua e no Sol, que a exercida pelo Sol em Vénus ou Júpiter, etc. Não é mais simples do que existirem forças de natureza diferente sempre que os corpos mudam?

(83) A palavra **dialéctica** é muito antiga, mormente com o seu significado metodológico. Para **Platão**, a dialéctica era uma actividade que se identificava com o próprio acto de filosofar e tinha um claro objectivo ontológico. De então para cá, o valor atribuído à dialéctica como método de procura da verdade sempre se revelou discutível (como discutível é, afinal, todo o conteúdo da Filosofia). Alguns pensadores (como **Descartes**, por exemplo) reduziram-na à retórica. Outros atribuíram-lhe grande valor, e **Hegel** é um deles. É graças a ele que a dialéctica ocupa um lugar de destaque na Filosofia contemporânea. Hegel chamou a atenção para que a conhecida tríade tese-antítese-síntese não seja encarada como um esquema pré-formado aplicado mecanicamente. A dialéctica hegeliana é um todo complexo que compreende três momentos: o abstracto ou intelectual, o dialéctico e o especulativo. Estes três momentos constituem-se numa estrutura complicada que só se compreende mediante o significado das chamadas **categorias fundamentais da dialéctica de Hegel**. Essas categorias são:

- a de «*immediatez-mediação*», em que tudo o que se revela ao nosso espírito como imediato, não o é, está já como que reflectido no espírito;

- a de «*totalidade*», o todo que ocorre no espírito cognoscente entre o conteúdo deste e o que se lhe revela, e é portanto uma totalidade racional;
- a de «*negatividade-contradição*», em que há a contradição e a negação da situação contraditória, ambas conceptuais e lógicas;
- a de «*superação*» em que se atinge a síntese conceptual.

Marx proclama também que o mundo real é dialéctico e aceita as bases essenciais da dialéctica de Hegel, mas produz nela uma reviravolta de 180°. A dialéctica de Marx é a antítese da de Hegel, porque é uma dialéctica material.

Assim, no que se refere à categoria *immediatez-mediação*, Marx considera que todo o objecto que surge como imediato é ontologicamente imediato, existe independentemente do espírito.

Quanto à «*totalidade*», ela é uma totalidade material. Marx não concorda que o todo real que ocorre da interacção dialéctica sujeito-objecto seja ideal e espiritual. É, sim, natural e material.

No que diz respeito à «*negatividade-contradição*», elas são reais, e não meramente conceptuais e lógicas.

Finalmente a «*superação*», segundo Marx, não pertence à ordem conceptual, não é meramente pensada.

(84) O fisico experimental e fisico teórico poderão ser definidos do seguinte modo:

Fisico experimental - cientista que estuda as ideias teóricas da Física e se dedica a aplicá-las e a verificá-las experimentalmente.

Físico teórico - cientista que analisa os resultados experimentais da Física e reflecte teoricamente com base neles.

(85) A **Teoria da Relatividade Restrita**, por exemplo, é um claro exemplo de teoria que muito mais facilmente sustenta uma tese racionalista do que empirista. Senão vejamos.

Onde está o germe dessa teoria? De que base parte ela? De uma base empírica?

O germe da Teoria da Relatividade encontra-se numa contradição lógica interna da Física newtoniana: havia leis que eram covariantes para as transformações de Galileu (as da Mecânica) e outras que o não eram (as do Electromagnetismo).

A Teoria da Relatividade Restrita assenta em dois postulados e, com base neles, constrói um «monumento» lógico, onde a coerência inatacável foi, pelo menos nos primeiros tempos, a sua maior base de sustentação. Esses dois postulados, o *princípio da relatividade de Einstein* e o *princípio da constância da velocidade da luz* foram adoptados por Einstein por terem uma evidência empírica? Vamos procurar responder a esta questão.

Como sabemos, a teoria de que estamos a tratar provocou muita polémica e tardou a ser aceite pela comunidade dos físicos. Porquê? Só porque chegava a algumas previsões estranhas? Só porque prestava um atestado de insuficiência à orgulhosa Mecânica newtoniana? Cremos que há outra razão importante e que é o facto de a evidência experimental para os princípios de que Einstein partiu ainda ser insegura (ele próprio não referiu as experiências de Michelson e Morley, o que quer dizer que, se as conhecia, pouca importância lhes deu). E, talvez por falta dessa evidência experimental segura, e não só por inércia, as incoerências com que a Física Clássica se debatia estavam a ser discutidas em 1905 dentro de um espírito de «bom senso» no quadro conceptual dessa mesma Física Clássica (havia a teoria de Lorentz para servir de foco de investigação e tentativa de saída para a crise).

Que fez Einstein? Numa atitude revolucionária, insólita mesmo, guiado muito mais por uma intuição racional do que por evidências empíricas, chegou a uma teoria cuja aceitação se impôs fundamentalmente por ser:

1º - altamente coerente do ponto de vista lógico;

2º - com grande capacidade de fazer previsões experimentais que até hoje jamais foram infirmadas.

(86) **Bachelard** era um materialista racionalista porque, acreditando ontologicamente num mundo material, defendia a existência de um «vector» **epistemológico** dirigido da razão para a experiência. (Bachelard, 1986, pp. 11 e 12). Segundo ele, “*uma experiência científica é uma razão confirmada*”. Talvez por associar um materialismo a um racionalismo, muitas das suas ideias são perfeitamente adaptáveis a uma filosofia que não privilegie um vector epistemológico em favor do outro vector de sentido contrário. Por exemplo, em Bachelard os dois aspectos, subjectivo e objectivo, estão intimamente ligados. E, tal como ele afirma, “*é numa verdadeira síntese das contradições metafísicas que está empenhada a ciência contemporânea*”.

(87) Há alguns anos, quando o programa de Ciências da Natureza era ensinado por professores de Biologia e Geologia e de Física e Química, porque o referido programa tinha então uma componente razoável de conteúdo de Física e Química, passou-se o seguinte episódio. Entrou um aluno pelo laboratório de Física dentro, com um teste na mão e um ar preocupado, e perguntou-nos. “*Stor, quem descobriu o átomo? É uma pergunta do ponto e eu tenho de ter a certeza que respondi bem!*”

Um tal ponto tinha certamente a assinatura de um professor positivista...

(88) Alguns comentadores do trabalho de **Bachelard** vêem os **obstáculos epistemológicos** na linha dos complexos freudianos. Seja como for, Bachelard intitula a sua teoria dos obstáculos epistemológicos como uma **psicanálise do conhecimento**

objectivo (Bachelard, 1981, pp. 165-190). Ela resultou, de facto, de uma análise do pensamento científico, particularmente do pensamento físico, que Bachelard conhecia em profundidade, e onde concluiu estarem esses obstáculos epistemológicos alicerçados na estrutura psíquica do ser humano.

(89) Por exemplo, na sua «*Epistemologia*» (1981, p. 170) **Bachelard** escreve o seguinte:

“Na formação de um espírito científico, o primeiro obstáculo é a experiência inicial, é a experiência situada antes e acima da crítica, que é necessariamente um elemento integrante do espírito científico. Dado que a crítica não operou explicitamente, a experiência inicial não pode em caso algum constituir um apoio seguro.(...)”

Eis então a tese filosófica que iremos defender: o espírito científico tem de se formar contra a Natureza, contra aquilo que, em nós e fora de nós, é o impulso e a instrução da Natureza, contra o entusiasmo natural, contra o facto colorido e variado. O espírito científico tem de se formar deformando-se. Perante a Natureza, ele não pode instruir-se senão purificando as substâncias naturais e ordenando os fenómenos misturados. A própria Psicologia tornar-se-ia científica se se tornasse discursiva como a Física, se se apercebesse de que em nós, assim como fora de nós mesmos, só compreendemos a Natureza resistindo-lhe.”

(90) No «*Novum Organum, II*», **Bacon** escreveu o seguinte (aforismo XVII):

“quando falo de formas não me refiro senão àquelas leis e determinações de actualidade absoluta que governam e constituem qualquer natureza simples - como calor leveza, peso - em qualquer matéria e sujeito em que possam dar-se. Assim a forma do calor ou a forma da leveza não é outra coisa senão a lei do calor e a lei da leveza”.

(91) Na introdução à sua obra *«Ensaio sobre o Entendimento Humano»*, **Locke** demarca o objectivo e método da Filosofia da Ciência ao afirmar que ela não se destina a resolver ou explicar o problema da alma, mas a fornecer os processos através dos quais o nosso entendimento forma as ideias (Leroy, 1985, pp. 47 a 52).

Mais tarde, **Hume** perseguiu o mesmo objectivo de Locke no seu livro *«Investigações sobre o Entendimento Humano»*. Segundo Hume todos os nossos estados psíquicos são formados por elementos, umas espécies de impressões que se associam para formar os estados psíquicos complexos, por meio de um fenómeno importante: a associação de ideias (Vergez, 1984). É esta a razão, cremos, pela qual se atribui o nome associacionismo à corrente que Hartley, Brown, Stuart Mill e Spencer desenvolveram na sequência da filosofia empirista inglesa do século XVIII.

Spencer chegou mesmo a desenvolver um atomismo da mente, o *atomismo psicológico*, em que os fenómenos psíquicos eram considerados conjuntos de elementos atómicos idênticos. Esta concepção também foi desenvolvida em França através da escola dos sensistas, ou escola do abade de **Condillac**. Para ele todo o nosso conhecimento consta de conjuntos de sensações ou sensações modificadas.

A partir de aí, o processo do conhecimento não mais deixou de ser encarado também na sua faceta psicológica, como fenómeno pessoal, individual, idiossincrásico. Os empiristas e os sensistas são, pois, quanto ao seu método, *subjectivistas*.

(92) O **positivismo** não é apenas uma teoria do conhecimento ou o indício de uma nova metodologia de conhecimento. É uma visão da realidade e do pensamento filosófico acerca da realidade. A realidade é o mundo dos factos, dos produtos da técnica, todo o pensamento deve submeter-se à Ciência e à Técnica como exemplos do exercício prático-racional desse pensamento.

(93) A este respeito, é célebre a seguinte afirmação de **Einstein e Infeld** (1966, p. 235):

“A Ciência não é apenas uma colecção de leis, um catálogo de factos não relacionados entre si. É uma criação da mente humana, com os seus conceitos e ideias livremente inventados. As teorias físicas tentam formar um quadro da realidade e estabelecer a sua conexão com o amplo mundo das impressões sensoriais. Assim, a única justificação para as nossas estruturas mentais é se e de que maneira as nossas teorias formam tal elo.”

E **Bronowski** (1972, p 29) dá o seguinte exemplo:

“Pode dizer-se que a revolução científica começou no ano de 1543, quando Copérnico (...) recebeu o primeiro exemplar impresso do livro que terminara há perto de doze anos. A tese deste livro é de que a Terra se move em redor do Sol. Quando é que Copérnico saiu e registou este facto com a sua máquina fotográfica? Qual o aspecto da Natureza que o impeliu à sua chocante conjectura? Em que estranho sentido se poderá chamar a esta conjectura um registo neutro do facto?”

A propósito da citação de Einstein, é importante dizer-se que ele acreditou sempre que existe uma realidade exterior ao sujeito que é inteligível e jamais perdeu a fé na possibilidade de, através das construções da Ciência, apreender essa mesma realidade exterior.

Os físicos idealistas e positivistas inspirados na Escola de Copenhaga não atribuem qualquer significado a uma realidade subjacente aos factos experimentais e também reconhecem o conhecimento científico como construção humana.

(94) A este respeito, **Bachelard** (1986, p. 16) afirmou o seguinte:

“A observação científica é sempre uma observação polémica; ela confirma ou infirma uma tese anterior, um esquema prévio, um plano de observação; mostra demonstrando, hierarquiza as aparências; transcende o imediato; reconstrói o real depois de ter reconstruído os seus esquemas. Naturalmente, a partir do momento em que se passa da observação à experimentação, o carácter polémico do conhecimento torna-se ainda mais nítido. Nesse caso é preciso que o fenómeno seja catalogado, filtrado, depurado, vertido no molde dos instrumentos. Ora os instrumentos não são mais que teorias materializadas. Daí saem fenómenos que trazem por todo o lado a marca teórica.”

(95) Por exemplo, o **vitalismo de Nietzsche** critica, na visão positivista da Ciência, a excessiva importância epistemológica atribuída à matematização do real.

Segundo Nietzsche, esta matematização não nos conduz ao conhecimento autêntico dos objectos, mas apenas a estabelecer relações quantitativas entre eles. Considera que o modelo matemático da Natureza se baseia na simplicidade do mundo, quando na realidade ele é complexo e tende a igualar o que de facto é diferente. Querer reduzir todas as qualidades a quantidades é uma loucura, afirma Nietzsche. Qualquer lei da Natureza não é nada que conheçamos em si. Conhecemos apenas os seus efeitos, isto é, a sua relação com outras leis da Natureza.

A **fenomenologia de Husserl** também critica severamente o positivismo, por condicionar a visão do homem acerca do cosmos, não ter em conta a intencionalidade da consciência do sujeito cognoscente, a relação íntima do objecto ao eu. Trata-se, pois, de uma visão desumanizada do conhecimento.

(96) A especulação metafísica é saudável quando não é mascarada e incide sobre temas que são particularmente problemáticos e mesmo polémicos. Um desses temas, em Física, é a interpretação dos **fundamentos da Mecânica Quântica**. Tal como vimos na nota 23, opõem-se duas correntes de pensamento: uma causalista; outra indeterminista.

Enquanto que a corrente causalista admite que a Mecânica Quântica não é uma teoria completa, deverá ambicionar ir mais além e procurar interpretar em termos causais as suas estranhas experiências (experiência da dupla fenda, experiência de Grangier, Roger e Aspect, etc.), a corrente indeterminista defende que a Mecânica Quântica é completa, pelo que essas experiências jamais serão interpretadas em termos de uma sequência causal de acontecimentos. Elas constituem factos que devemos aceitar como tal sem procurar encontrar uma realidade subjacente a eles. Elas são a última realidade.

CAPÍTULO IV

CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS NO ENSINO DA FÍSICA

(1) Vamos referir um exemplo de uma «entrevista clínica» de Piaget. Esta destina-se a pesquisar se uma criança coordena as noções de forma e quantidade e atinge a noção de conservação.

O experimentador enche de água dois recipientes de forma cilíndrica e iguais. Verifica se a criança percebe que os recipientes são iguais. A seguir despeja a água de um dos recipientes cilíndricos num recipiente baixo e redondo e formula perguntas como estas:

«Qual dos recipientes contém mais água?»

«Será que eles contêm a mesma quantidade de água?»

Se a criança, ainda no estágio de pensamento pré-operacional segundo Piaget, não desenvolveu ainda o conceito de conservação, responderá que os recipientes não contêm a mesma água.

Foi com «entrevistas clínicas» do tipo desta que Piaget concluiu, por exemplo, que a criança tem uma primeira noção de velocidade independente do intervalo de tempo.

Essa noção de velocidade resulta de uma ideia primitiva de ordem, o antes e o depois, e está relacionada com a ultrapassagem (Piaget, 1976, pp. 25 e 26).

(2) Este mesmo tipo de deficiências tem sido sobejamente confirmado por nós em testes aplicados a alunos do ensino secundário.

(3) Na realidade, na Física Clássica surgiram diversas massas inerciais, cada uma das quais corresponde a um aspecto diferente que tem a ver com a inércia. E apareceu também a massa gravitacional, que nada tem a ver com a inércia (Couderc, 1977, p. 92). A identidade entre as diversas massas do mesmo corpo nada tinha de fundamental, era uma identidade baseada no facto de sempre se terem obtido medidas iguais para as diversas massas do mesmo corpo, por maior que tenha sido a exactidão conseguida nas mesmas.

Porém, ainda que com valores idênticos para o mesmo corpo, a massa inercial e a massa gravitacional são conceitos distintos em Física Clássica, conforme se conclui do quadro seguinte:

Massa inercial	Massa gravítica
Contribui para a <i>não alteração</i> do estado de repouso e de movimento rectilíneo uniforme, pois dela depende a inércia.	Contribui para a <i>alteração</i> do estado de repouso e de movimento rectilíneo uniforme, pois dela depende a força gravítica que acelera para a Terra.
Mede-se por um <i>processo dinâmico</i> .	Mede-se por um <i>processo estático</i> .
Define-se com base na segunda lei de Newton.	Define-se com base na lei da gravitação.

(4) Os exemplos apresentados são suficientes para a análise que se vai seguir, razão porque nos dispensamos de referir as concepções em outras áreas da Mecânica, por exemplo na Hidrostática.

(5) Numa carta que Newton enviou ao filólogo inglês Richard Bentley, ele escreveu a determinada altura o seguinte:

“Que a gravidade seja inata, inerente e essencial à matéria, de modo a que um corpo possa actuar sobre outro, à distância, através de um vácuo, sem a mediação de qualquer coisa pela qual, ou através da qual, essa acção ou força possa ser transmitida de um corpo ao outro, é para mim tão grande absurdo que não creio que qualquer homem possuidor, em questões filosóficas, de uma faculdade de pensar adequada, possa jamais aceitá-lo.” (Westfall, 1988, p. 505).

(6) Kepler, influenciado por William Gilbert (1544-1603), que estudou experimentalmente os fenómenos magnéticos e publicou, em 1600, o tratado «*De Magnete*», interpretou a atracção do Sol sobre os planetas como sendo devida a uma força de natureza magnética.

(7) Ao referirem o objectivo do seu livro Piaget e Garcia (1987, pp. 37 e 38) escrevem o seguinte:

“Num caso particular, constituído pela evolução da Física entre o período de Aristóteles e os últimos períodos pré-newtonianos, foi-nos possível estabelecer correspondência, e mesmo estreita, entre as quatro fases históricas (os dois motores aristotélicos, o recurso a um único motor externo, a descoberta do impetus e depois a descoberta da aceleração) e as quatro etapas da psicogénese.(...)”

Num tal caso, o paralelismo entre a evolução das noções no decorrer da história e no seio do desenvolvimento psicogenético refere-se ao próprio conteúdo das noções sucessivas.(...)”

Mas é óbvio que seria absurdo procurar generalizar um tal paralelismo de conteúdos no caso das teorias propriamente científicas, como as que surgiram entre a Mecânica newtoniana e a Relatividade einsteiniana, de tal modo que o essencial da nossa investigação se dirigirá não para o conteúdo das noções mas para os instrumentos e mecanismos das suas construções”.

(8) Esta concepção alternativa foi divulgada numa reportagem com que o Professor Novak ilustrou a conferência inaugural do «*Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*», que teve lugar em Cornell, no ano de 1993.

(9) Para que um determinado material de aprendizagem, um livro, por exemplo, seja potencialmente significativo torna-se necessário que reúna duas condições:

1º- Tem de ter significado lógico, isto é, deve ser susceptível de vir a incorporar-se de modo substantivo na estrutura cognitiva do aprendiz, isto é, deve estar estruturado de tal modo que os novos conhecimentos «ancorem» nos conceitos previamente existentes na estrutura cognitiva.

2º - Tem de possuir significado psicológico, isto é, tem mesmo de haver conceitos adequados à aprendizagem desse material na estrutura cognitiva do aprendiz, conceitos de grau de generalidade e abrangência maior (os «subsunçores») onde os novos conceitos vão ser «subsumidos», isto é, vão ficar integrados através de ligações aos subsunçores.

(10) Por exemplo, no caso do pêndulo elástico vertical, temos:

A - alongamento da mola na posição de equilíbrio;

k - constante da mola;

y - coordenada da posição genérica, relativamente à posição de equilíbrio;

$g + d^2y/dt^2$ - módulo da aceleração relativamente à queda livre;

$m (g + d^2y/dt^2)$ - força no corpo;

$k (A - y)$ - força exercida pela mola;

Tem-se, então,

$$m (g + d^2y/dt^2) = k (A - y)$$

Mas como

$$mg = kA$$

vem

$$m d^2y/dt^2 = -k y$$

E o resto é exactamente igual ao tratamento clássico.

(11) A geometria da Mecânica newtoniana define-se como um caso particular da geometria da Relatividade Restrita, a partir de um conjunto de linhas rectas no espaço-tempo newtoniano em conjunto com os planos newtonianos de absoluta simultaneidade perpendiculares ao eixo dos tempos.

O que a primeira lei traduz é precisamente a afirmação axiomática de que essas linhas rectas no espaço-tempo existem. São essas rectas, afinal, as trajectórias a que se refere a 1ª lei, independentemente de haver ou não corpos livres no Universo.

Como a 1ª lei postula a existência dessas linhas rectas no espaço-tempo, é uma lei e não uma definição. Trata-se de uma lei experimental.

A 2ª lei traduz uma afirmação acerca do modo como o ambiente de uma partícula afecta o comportamento desta no espaço-tempo.

(12) Se considerarmos como marco da queda do paradigma do éter a aceitação generalizada da Teoria da Relatividade Restrita, que rejeitou a sua existência, então poderemos afirmar que pelo menos nas duas primeiras décadas do nosso século ainda o paradigma se mantinha, conforme o testemunham factos como o da conferência de Haarlem, em 1913, e o não recebimento de qualquer prémio Nobel, por Einstein, nesse período (recebeu-o em 1921 pelo trabalho sobre o efeito fotoeléctrico).

(13) A definição de peso como força igual à soma da força gravítica com as forças de inércia que actuam no corpo é uma definição que funciona bem. Porém, tem o inconveniente de recorrer às forças de inércia que os alunos só estudam numa fase avançada da sua aprendizagem da Física, e muitos nem sequer as estudam.

(14) Um exemplo de um modelo alternativo minoritário na Física actual é o modelo *do estado estacionário* do Universo. A grande maioria dos físicos defende hoje o impropriamente chamado *modelo do Big-Bang*. Pela nossa parte preferimos designá-lo por **modelo padrão da cosmologia**. Segundo este, o Universo expandiu-se a partir de uma fase extremamente densa e quente.

Trata-se de um modelo a respeito do qual é ilegítimo falar que está certo ou errado. A disputa com os outros modelos põe-se em termos de verificar qual deles se baseia:

- no mínimo de pressupostos ou afirmações não comprovadas empiricamente;

- no máximo de observações experimentais confirmadas;
- no máximo de previsões falsificáveis.

No que respeita ao modelo padrão, ele baseia-se em observações experimentais confirmadas, tais como:

- a expansão das galáxias (de acordo com a lei de Hubble);
- a observação da homogeneidade em larga escala do Universo, a partir da contagem das galáxias;
- a existência de uma radiação de fundo de micro-ondas e a sua isotropia com uma temperatura de aproximadamente 3 K.

O modelo é também aceite porque faz previsões, e essas previsões têm sido confirmadas. São exemplos:

- a previsão do número de famílias de neutrinos ($N_\nu \leq 3$) a partir dos conhecimentos sobre a nucleossíntese primordial dos átomos leves (^4He , ^3He , D , ^7Li);
- a previsão do tipo de evolução das principais estruturas cósmicas, como, por exemplo, as galáxias;
- a previsão das idades das estrelas mais antigas que se conhecem.

Mas o modelo não está isento de partes fracas e tem levantado alguns problemas ainda por resolver, daí haver fundamento para o aparecimento de modelos alternativos.

(15) Se o conceito de massa, em Newton, se revelava confuso, o conceito de força não o era menos. Ele definiu três tipos distintos de forças, a saber:

- a **força inata** de um corpo, ou **inércia**, como uma força resistente do corpo à aceleração, e também como impulso (ao interagir com outro corpo);
- a **força imprimida**, “*uma acção exercida sobre um corpo com o fim de alterar o seu estado de repouso ou de movimento em linha recta*” (Newton, 1990, p. 3);
- a **força centrípeta**, “*pela qual os corpos são dirigidos ou impelidos, ou tendem de qualquer modo para um ponto como centro*”. (Ibidem, p. 3)

Newton considerava como exemplos de forças centrípetas a gravidade e o magnetismo, e distinguia três quantidades da força centrípeta (Ibidem, pp. 4 a 6) :

- a **quantidade absoluta**, “*proporcional à eficácia da causa que a propaga a partir do centro em seu redor*”;
- a **quantidade acelerativa**, “*proporcional à velocidade que gera num dado tempo*”, portanto à aceleração e, que “*é maior nos vales, e menor nos cumes de montanhas extremamente altas*”;
- a **quantidade motora**, que é “*proporcional ao movimento que ela gera em um dado intervalo de tempo*”.

No caso da gravidade, e, em termos formais e actuais que Newton não utilizou, a *quantidade absoluta* correspondia ao produto, GM , entre a massa gravítica causadora da gravidade e a constante de gravitação universal, a *quantidade acelerativa* correspondia à intensidade de campo gravítico, GM/r^2 , e a *quantidade motora* ao peso, GmM/r^2 , do corpo cuja massa inercial é m .

Newton falava nestas quantidades todas como forças distintas. A força imprimida tinha para Newton um significado igual ao da actual grandeza impulso (Clelland, 1993, p. 100), e é neste sentido que ele enuncia a segunda lei nos seguintes termos (Newton, 1990, p. 15):

“A mudança de movimento (leia-se variação da quantidade de movimento) é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direcção da linha recta na qual aquela força é imprimida”.

Os dois exemplos que se seguem revelam outras tantas imprecisões de Newton que não beliscam o brilhantismo indiscutível da sua obra.

Um é o uso do pião para ilustrar a primeira lei. No mínimo é indutora de confusão esta mistura da inércia rotacional com a 1ª lei.

Outro exemplo, e mais sugestivo, é a seguinte passagem para ilustrar a terceira lei, a que já nos referimos na página 397:

“Se um cavalo puxa uma pedra amarrada a uma corda, o cavalo (se posso dizer assim) vai ser igualmente puxado de volta na direcção da pedra, pois a corda distendida, pela mesma tendência a relaxar ou distorcer-se, puxará o cavalo na direcção da pedra, tanto quanto ela puxa a pedra na direcção do cavalo, e obstruirá o progresso de um tanto quanto promove o do outro” (Ibidem, p. 16).

A conclusão de Newton da igualdade das forças exercidas pela corda na pedra e no cavalo só será válida numa situação de equilíbrio estático ou dinâmico, e, mesmo nessa condição, as forças em questão pertencem a pares acção-reacção diferentes.

(16) Já tem sido destacado que o ciclo vicioso na definição de massa poderá não ter existido (Brown, 1960, Doménech, 1993). De facto, se Newton se referia a densidade com o significado de densidade relativa ele poderia ter adoptado a seguinte definição operacional de densidade de uma substância: quociente do peso de um volume qualquer dessa substância e o peso, no mesmo lugar e nas mesmas condições de pressão e temperatura, de um volume igual de uma substância padrão:

$$d = \frac{P}{P_p} = \frac{m}{m_p}$$

Mas, mesmo assim, a definição de massa com base no volume e na densidade revela-se inapropriada. Com efeito, a densidade relativa é adimensional e a densidade não o é. A sua unidade pressupõe como equação de definição a relação

$$\rho = \frac{m}{V}$$

que pressupõe a definição prévia da massa (daí o ciclo vicioso na definição newtoniana de massa). Para além disso, estão nitidamente em jogo duas massas diferentes: a massa que é proporcional ao peso (massa gravítica) e a massa que traduz a inércia (massa inercial).

(17) Uma proposição matemática $P(x, y, z, \dots)$, válida num sistema de coordenadas $S(x, y, z, \dots)$, diz-se **covariante** para uma transformação que relaciona as variáveis do sistema S com as de um outro sistema $S'(x', y', z', \dots)$ se, uma vez sujeita P a tal transformação, a proposição $P'(x', y', z', \dots)$ que obtemos mantém a mesma estrutura lógico-matemática nesse referencial S' .

(18) Por uma questão de uniformidade de notações, não respeitamos as notações originais dos autores a que nos referimos.

(19) Esta concepção de um campo subjacente ao Universo não é original destes autores. Desde que, há um século, os matemáticos William Hamilton e Carl Gustav Jacobi demonstraram ser possível tratar os acontecimentos locais como função de um campo total, vários cientistas conjecturam sobre a existência desse campo (Laszlo, 1993).

Acabámos de referir uma das conjecturas que se baseia na existência de um campo total para interpretar a inércia de um corpo sem o recurso à grandeza massa. Outra conjectura baseia-se na existência de um campo sub-quântico, de toda uma dinâmica sub-quântica que explicaria os diversos mistérios que ocorrem na Natureza, desde as grandes intuições simultâneas, como as que levam dois cientistas a descobrirem o mesmo fenómeno simultaneamente, até aos fenómenos quânticos da não-localidade (Laszlo, 1993).

CAPÍTULO V

JUÍZOS COGNITIVOS E DE VALOR EDUCACIONAL

(1) Ainda recentemente ocorreu um colóquio internacional em Lisboa acerca de educação científica em que estiveram presentes especialistas de muitos países de todos os continentes, e onde transpareceu o facto de a educação científica decorrer de modo deficiente em praticamente todos eles.

(2) Vários trabalhos do domínio das Neurociências apontam no sentido de que o pensamento, os sentimentos, as emoções, as paixões e os mais variados sinais viajando em duplo sentido entre o cérebro e o restante corpo, veiculando informações e respostas provocadas pela interacção do organismo com o exterior «funcionam» de modo íntimo a nível neural. Esta complexidade dos mecanismos neurológicos condiz com a complexidade do fenómeno da inteligência e com dados provenientes da Psicologia da aprendizagem humana que apontam também no sentido de os factores acima referidos influenciarem significativamente a aprendizagem.

(3) Se, como dissemos, os aspectos afectivos são importantes na aprendizagem, uma boa relação educativa entre o professor e o aluno é fundamental. Uma boa relação educativa implica ter em conta e procurar valorizar ao máximo os contextos em que ela decorre, o grupo-turma, a escola, o sistema educativo em geral e o contexto cultural. Será útil começar a criar condições para pensar numa nova forma de encarar o sistema professor-aluno, em que uma estrutura funcional (Ribeiro, 1990, p. 145) prevaleça sobre a antiga estrutura de posições.

(4) Há hoje sensores com interfaces facilmente portáteis. Têm praticamente as dimensões de uma pequena máquina de calcular e adaptam-se a máquinas de calcular com potencialidades gráficas. Podemos pegar num sistema desses e ir estudar experimentalmente o modo como uma grandeza que a nós diz respeito varia em tempo real.

Podemos, por exemplo, ir para uma montanha russa de uma Feira Popular e ver como varia a aceleração à medida que nos movemos nela.

(5) Não podemos aceitar desfasamentos entre os programas de Física e Matemática como os que actualmente existem. Por exemplo, nos programas actuais de Matemática, a proporcionalidade inversa surge apenas no 9º ano, e o programa de Física contempla o estudo da variação da resistência dos condutores eléctricos com a secção, onde se utiliza a mesma proporcionalidade, no 8º ano. Outro exemplo: as equações literais são estudadas em Matemática na segunda metade do 8º ano, e o professor de Física utiliza equações literais quase no início desse mesmo ano.

GLOSSÁRIO

Acosmismo - doutrina que nega a existência do mundo real e sensível.

Aprendizagem mecânica ou rotineira - aprendizagem que decorre com incorporação arbitrária, não substantiva, não duradoira do novo conhecimento na estrutura cognitiva; o novo conhecimento não é «ancorado» de modo inteligível aos conceitos já existentes na estrutura cognitiva, não é integrado de modo compreensível na rede conceptual previamente existente.

Aprendizagem significativa - aprendizagem que consiste na incorporação substantiva, não arbitrária do novo conhecimento na estrutura cognitiva; o novo conhecimento é «ancorado» aos conceitos já existentes na estrutura cognitiva, é integrado de modo inteligível na rede conceptual previamente existente.

Aprendizagem subordinada - aprendizagem significativa em que a nova informação adquire significado através da sua subordinação («subsunção») a subsunções existentes na estrutura cognitiva.

Aprendizagem superordenada - aprendizagem significativa em que a nova informação adquire significado através da sua associação aos subsunções presentes na estrutura cognitiva de tal modo que se estabelecem novos conceitos mais gerais do que os previamente existentes; os conceitos prévios incorporam-se, então, em conceitos novos mais abrangentes.

Avaliação - processo de recolha de informações de modo a poder formular juízos de valor destinados a tomar decisões.

Averroísmo - corrente filosófica que se desenvolveu no mundo cristão por influência do filósofo árabe e comentador de Aristóteles Averróis, a partir mais ou menos da terceira década do século XIII; a influência dessa interpretação heterodoxa do aristotelismo faz-se sentir claramente em Paris a partir do último quartel do século XIII.

Ciência normal (em Kuhn) - actividade científica baseada num quadro conceptual constituído em paradigma por uma comunidade científica, isto é, um quadro conceptual que essa comunidade reconhece como válido e com base no qual vai tentando resolver os problemas científicos que vão surgindo.

Ciência revolucionária - o oposto da actividade científica normal que se traduz por uma tentativa de contribuir para a emergência de um novo paradigma, que põe em causa os pressupostos em que assenta o paradigma vigente.

Círculo de Viena - grupo de pensadores que tinha como fulcro Moritz Schlick e a que pertenceram, entre outros, Hans Hahn, Rudolf Carnap, Otto Neurath e Hans Reichenbach, e cujo objectivo era elaborar uma teoria explicativa do mundo, baseada na Física elevada ao seu mais elevado grau de positivismo, isto é, liberta completamente da metafísica.

Conceito - construção da mente humana traduzida por um signo ou símbolo, que provém das regularidades encontradas num objecto ou num acontecimento, e cujo significado pode variar de ser humano para ser humano.

Conceito científico - construção da mente humana traduzida por um signo ou símbolo, que provém das regularidades encontradas num objecto ou num acontecimento, e cujo significado é compartilhado por uma comunidade de cientistas.

Concepção alternativa («alternative conception») ou ***estrutura alternativa («alternative framework»)*** - representação que, sendo estruturada e plausível, e tendo uma fundamentação que está para além do descuido ou da ignorância, difere qualitativamente da que a Ciência paradigmaticamente perfilha.

Concepção errada - representação que resulta num erro conceptual mais ou menos grosseiro, fruto de descuido ou de falta de informação.

Conjunção inferior - posição de um planeta interior em que, durante o seu movimento retrógrado, passa pela frente do Sol, isto é, o planeta fica interposto entre o Sol e a Terra.

Conjunção superior - posição de um planeta em que, durante o seu movimento progressivo ou directo, passa por trás do Sol, isto é, o Sol fica interposto entre o planeta e a Terra.

Construtivismo radical - pensamento filosófico segundo o qual os esquemas que se vão progressivamente construindo acerca do mundo constituem o conhecimento do mesmo, sem qualquer possibilidade de saber se «vão pelo caminho certo» ao encontro da realidade desse mundo.

Construtivismo trivial - pensamento filosófico segundo o qual os esquemas que se vão progressivamente construindo acerca do mundo constituem um conhecimento cada vez mais próximo da realidade desse mundo.

Dados ou resultados - são os produtos da transformação de factos, isto é, da respectiva categorização, ordenação e tratamento qualitativo ou quantitativo.

Diferenciação progressiva (segundo Ausubel) - processo através do qual um conceito subsunção se vai ramificando, vai adquirindo novos significados cada vez mais específicos, vai sendo permanentemente elaborado, modificado; ocorre por força da aprendizagem subordinada;

Empirismo radical - posição filosófica segundo a qual a experiência é o ponto de partida exclusivo do conhecimento; os dados dos sentidos são-nos proporcionados «gratuitamente» pela Natureza, isto é, sem a intervenção da razão

Escola de Copenhaga - grupo de pensadores, a que pertenceram grandes físicos quânticos como Bohr, Heisenberg, Pauli, Born, Dirac que renunciaram à descrição causal dos fenómenos quânticos no espaço e no tempo postulando de modo frontal contra as leis da Física Clássica; defenderam um indeterminismo em que a realidade se cinge em exclusivo às grandezas estritamente mensuráveis e em que a Física Quântica é a teoria completa da realidade.

Escola de Edimburgo - grupo de pensadores que, nos finais dos anos 60, se reuniram em torno de David Edge e que incluía historiadores e socialistas da Ciência como Barry Barnes, David Bloor, Stephen Shapin e Donald MacKenzie; procuraram discutir os vários sucessos empíricos das abordagens práticas da Sociologia da Ciência, os vários factores sociológicos que interferem na Ciência, de modo a racionalizar os aspectos sociológicos que envolvem a Ciência.

Escola de Marburgo - movimento filosófico de renovação do pensamento kantiano designado por neokantismo e que parte do princípio que o conhecimento filosófico se deve limitar à fundamentação e justificação das conceptualizações da chamada Ciência positiva, segundo uma análise das condições desse conhecimento, na linha de Kant, e sem entrar em especulações metafísicas.

Escola grega - conjunto de filósofos que, convivessem ou não, perfilhavam doutrinas de matriz comum, por exemplo: a *escola jónica* (de Tales e Anaximandro, entre outros), a *escola pitagórica* (com Pitágoras, Filolau, etc.); a *escola metafísica* (de Heráclito de Éfeso, Parménides, e outros); a *escola atomista* (com Leucipo de Mileto, Demócrito de Abdera, etc), a *escola ateniense* (com Sócrates, Platão e Aristóteles como expoentes máximos).

Escola pitagórica - Escola grega fundada por Pitágoras que defendia a ideia de que o mundo é uma harmonia resultante de certas leis e relações numéricas, havendo uma relação matemática entre as coisas e os números.

Estrutura cognitiva - é a estrutura conceptual complexa de cada indivíduo que resultou da sua aprendizagem e através da qual ele vai adquirir o novo conhecimento.

Estrutura conceptual - modo como os conceitos estão ligados entre si; pode dizer respeito a uma fonte de conhecimento (um livro, uma parte de um livro, por exemplo), ou a uma teoria científica, ou à estrutura cognitiva de um sujeito, etc.

Factos - são os produtos dos registos efectuados com base nos objectos/acontecimentos, uma vez feito um juízo valorativo acerca da sua autenticidade.

Fenomenalismo - doutrina segundo a qual há um mundo real mas incognoscível que se esconde por trás dos fenómenos a que a Ciência não tem acesso, e que só o conhecimento dos fenómenos que correspondem a essa realidade é objectivo da Ciência.

Fenomenismo - doutrina segundo a qual só os fenómenos são reais e cognoscíveis, isto é, nada existe subjacente a eles.

Fenomenologia - corrente filosófica inspirada nas ideias de Husserl que valoriza o papel da consciência do sujeito no conhecimento do objecto; põe em causa o psicologismo por pretender apreender o facto científico em si, como se revela à consciência, sem a intencionalidade desta, sem a interferência da consciência na construção do próprio facto, sem a sua transcendência para o objecto.

Fidelidade - característica de uma análise, de uma medição ou de uma avaliação que indica em que medida essa análise ou essa medição ou essa avaliação, se for repetida nas mesmas condições, conduzirá aos mesmos resultados.

Filogénese - desenvolvimento de formas vivas a partir de outras formas através dos tempos geológicos; neste trabalho aplicamos o termo para significar o desenvolvimento das ideias construídas a partir de ideias anteriores ao longo dos séculos.

Forma (segundo Aristóteles) - aquilo que uma determinada «matéria», em «potência», é susceptível de receber; a mesma «matéria» pode receber várias formas.

Governança - termo proposto por Gowin para descrever todos os factores que controlam o significado de uma experiência educativa.

Idealismo imaterialista - pensamento filosófico segundo o qual não há um mundo real e sensível independente das nossas interpretações; as nossas ideias são a única realidade; os objectos não são mais do que as ideias que deles temos.

Mapa conceptual - diagrama que procura representar como é que os conceitos de uma determinada estrutura conceptual estão hierarquizados e relacionados entre si; trata-se de um quadro onde os conceitos, traduzidos pelas respectivas designações estão ligados entre si, geralmente a duas dimensões; segundo Novak, é uma boa maneira de «externalizar» a estrutura cognitiva de um aluno.

Matéria (segundo Aristóteles) - uma «potência» que pode receber algumas «formas» mas não todas para constituir os corpos; no fundo é uma das causas porque um corpo existe.

Materialismo dialéctico - doutrina filosófica que surgiu na linha da reacção à filosofia idealista alemã, particularmente à de Hegel; trata-se de uma concepção do mundo cujos pilares são o materialismo e a dialéctica, que dá, portanto, primazia ontológica à matéria, considerando esta como constituinte de todo o real, em movimento eterno regido por uma dialéctica natural com as suas próprias leis.

Meta-aprendizagem - aprendizagem do modo como o ser humano aprende.

Metacognição - conhecimento do modo como o conhecimento se constrói.

Metaconhecimento - conhecimento que lida com a natureza do conhecimento; faz parte da Metaciência que estuda o modo como a Ciência funciona para produzir o conhecimento.

Mónadas (de Leibniz) - elementos simples, activos, indivisíveis de que todos os corpos são feitos e que se distinguem uns dos outros pela sua actividade; ligam-se através de uma harmonia pré-estabelecida formando a multiplicidade dos seres universais.

Neopositivismo, positivismo lógico ou empirismo lógico - doutrina filosófica do chamado *Círculo de Viena* inspirada no trabalho no domínio da Lógica de Hilbert, Peano, Frege e na crítica de Mach à Mecânica newtoniana; o seu objectivo era fundamentar a Ciência em bases estritamente lógicas, extirpando-a de quaisquer conotações metafísicas; considera as teorias físicas como sistemas formais, lógicos, apoiados estritamente em dados experimentais; procurou demarcar-se da Psicologia e da Sociologia da Ciência, isto é, do modo como pensam os cientistas bem como do modo como actuam e porque actuam assim.

Ontogénese - desenvolvimento de um ser desde o estado embrionário até ao estado definitivo; neste trabalho aplicamos o termo para significar o desenvolvimento das ideias humanas a partir de ideias anteriores desde o nascimento.

Poder social - poder de influenciar, isto é, de provocar mudanças nos conhecimentos, sentimentos ou comportamentos das outras pessoas.

Positivismo - forma de empirismo que é renitente à especulação metafísica na Ciência; tende a considerar o conhecimento científico como modelar e exclusivo; só os dados dos sentidos e os conceitos a eles redutíveis são significativos em termos de conhecimento.

Princípio - preceito que se supõe válido numa dada área do conhecimento, sem que essa validade tenha sido deduzida logicamente.

Projectos e programas do alfabeto - designação por que são conhecidos grandes projectos e programas de ensino da Ciência que surgiram a partir dos anos 50 e de que resultaram cursos notáveis cujos títulos passaram a ser mais conhecidos pelas iniciais das várias palavras que compunham os seus nomes, geralmente extensos, como, por exemplo, PSSC (Physical Science Study Committee), SCIS (Science Curriculum Improvement Study), SSSP (Secondary School Science Project), etc.

Psicogénese - estudo do desenvolvimento do espírito, da origem da alma, da consciência, da memória, da inteligência e da vontade.

Psicologismo - pensamento de que é possível explicar tudo o que se passa na mente humana (ideias, sentimentos, volições, instintos, tendências, crenças, etc.) através de leis psicológicas consideradas científicas e objectivas; trata-se, pois, de uma tendência intelectual em reduzir os problemas filosóficos a problemas psicológicos.

Realismo ingénuo - pensamento de que há uma realidade exterior constituída por seres reais e autónomos que podemos conhecer independentemente e objectivamente; a nossa experiência sensorial corresponde exactamente à realidade exterior.

Reconciliação integrativa - processo cognitivo através do qual dois ou mais conceitos surgem pela primeira vez relacionáveis entre si ou relacionáveis de um modo diferente, originando conceitos mais inclusivos.

Registo - tudo o que imediatamente se extrai da observação de um objecto ou fenómeno.

Representação- ideia ou uma associação de ideias acerca de um fenómeno, de um simples conceito ou de uma teoria e que cada pessoa ou uma comunidade constrói a partir de informações recolhidas; trata-se de uma ideia sobre um objecto, uma explicação para um fenómeno ou um significado para um conceito.

Segundo Ausubel, o novo conhecimento só será apreendido de modo a «fazer sentido» e a ficar retido na memória se existirem na estrutura cognitiva conceitos relevantes, claros e inclusivos, que sirvam de ancoradouro ao novo conhecimento.

Representação individual - representação que, idiossincrasicamente, e mais ou menos espontânea ou estruturadamente, cada pessoa vai construindo como resultado da sua experiência, isto é, como resultado do «manuseamento» dos mais diversos «objectos» (que incluem os da realidade intrapessoal).

Representação social- uma representação compartilhada por diversos membros de uma comunidade (as representações sociais funcionam como sistemas cognitivos ou teorias para a decodificação e organização da realidade e permitem o diálogo e partilha de experiências entre os membros dessa comunidade).

Sensismo - doutrina gnossológica segundo a qual os sentidos são a única fonte de conhecimento, de que nada existe no pensamento que não tenha sido previamente detectado através dos sentidos.

Sofistas - pensadores gregos que não constituem qualquer grupo homogéneo ou «Escola» e que faziam profissão da sua sabedoria; ensinavam a arte de convencer pelo poder da argumentação e fizeram progredir a gramática, a retórica e a dialéctica.

Subsunçores, conceitos integradores ou conceitos-âncora - são conceitos relevantes que preexistem na estrutura cognitiva do aprendiz e cuja estrutura serve de substracto ao novo conhecimento, isto é, os novos conceitos são «ancorados» nos subsunçores, ligam-se a eles através de proposições com significado, quando ocorre a aprendizagem significativa do conhecimento novo.

Teoria - conjectura formada por um conjunto organizado de conceitos que procura interpretar uma determinada área do conhecimento.

Validade - característica de uma análise, de uma medição ou de uma avaliação que indica em que medida essa análise ou essa medição ou essa avaliação correspondem, de facto, àquilo que se está a analisar, medir ou avaliar.

BIBLIOGRAFIA GERAL

- **ABELÈS, F.; AUGER, L.; BAEUR, E.; COSTABEL, P.; DARMOIS, G.,** *O Século XIX, A Ciência Contemporânea*, Vol. III, Difusão Europeia do Livro, São Paulo, 1966
- **ADLER, C.,** *Does mass really depends on velocity, dad?*, American Journal of Physics, 55, 8, Aug. 1987
- **AGUIRRE, J.,** *Student - teachers' conceptions of science teaching and learning: a case study in preservice science education*, International Journal of Science Education, Vol.12, Nº 4, July-September 1990
- **AKRILL, T.; BENNET, G.; MILLAR, C.,** *Physics*, Edward Arnold, 1979
- **ALCAINE, G.,** *Sobre massa y energia*, Revista Española de Física, 3, 1, pp. 59-62, 1989
- **ALMEIDA, G.,** *Sistema Internacional de Unidades (SI)*, Plátano Editora, Lisboa, 1988
- **ALONSO, M.; FINN, E.,** *An Integrated Approach to Thermodynamics in the Introductory Physics Course*, The Physics Teacher, Vol. 33, May 1995
- **ALONSO, M.; FINN, E.,** *Física - um curso universitário*, Vol. 1, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1977
- **ALONSO, M.; GIL, D.; TORREGROSA, J.,** *Pensamiento espontaneo, propositos y practicas de la evaluacion de los profesores de Física y Química*, comunicação P-28 do 1.º Encontro Ibérico sobre Enseñanza de la Física, Universidad de Valladolid, Sep. 1991
- **ALQUIÉ, F.; RUSSO, F.; BEAUDE, J.; TONNELAT, M.; COSTABEL, P.; POLIN, R.,** *Galileu, Descartes e o Mecanismo*, Editora Gradiva, Lisboa, 1987
- **AMSTRONG, H.,** *'On the meaning of the word 'weight'*, School Science Review, Nº 190, pp. 185-186, Sept. 1973
- **AMSTRONG, H.,** *New definitions of force and mass*, School Science Review, Nº 167, pp. 271-272, Nov. 1967
- **AMSTRONG, H.,** *On the sensible use of the word 'weight'*, School Science Review, Nº 161, pp. 235-236, Nov. 1965

- **ANDERSON, O.**, *Some Interrelationships between Constructivist Models of Learning and Current Neurobiological Theory, with Implications for Science Education*, Journal of Research in Science Teaching, pp. 1037-1058, Dec. 1992
- **ANDERSON, J.**, *Newton's first two laws of motion are not definitions*, American Journal of Physics, Vol. 58, No.12, pp. 1192-1195, Dec. 1990
- **ARONS, A.**, *A guide to Introductory Physics Teaching*, Jonh Wiley & Sons, New York, 1990
- **ARONS, A.**, *Phenomenology and logical reasoning in introductory physics courses*, American Journal of Physics, Vol. 50, N° 1, Jan. 1982
- **ARONS, A.**, *The Various Language*, Oxford University Press, New York, 1977
- **ARZI, H.; WHITE, R.; FENSHAM, P.**, *Teachers' knowledge of Science: An Account of a Longitudinal Study in Progress*, Paper presented at the Annual Meeting of the American Educational Research Association, Washington, pp. 20-24, April 1987
- **AUSUBEL, D.; NOVAK, J.; HANESIAN, H.**, *Psicologia Educacional*, Rio de Janeiro, Ed. Interamericana, 1980
- **AYRES, A.**, *Newton's laws of motion*, School Science Review, Vol. 50, N° 172, pp. 608-610, March 1969
- **BACHELARD, G.**, *A Epistemologia*, Edições 70, Lisboa, 1981
- **BACHELARD, G.**, *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1977
- **BACHELARD, G.**, *O Materialismo Racional*, Edições 70, Lisboa, 1990
- **BACHELARD, G.**, *O Novo Espírito Científico*, Edições 70, Lisboa, 1986
- **BAIERLEIN, R.**, *Teaching $E=mc^2$* , The Physics Teacher, March 1991
- **BAIRD, J.**, *Teachers in Science Education*, in Development and Dilemmas in Science Education, ed. Peter Fensham, The Falmer Press, pp. 55-72, London, 1988
- **BALIBAR, F.**, *Einstein: Uma Leitura de Galileu e Newton*, Edições 70, Lisboa, 1988
- **BANFI, A.**, *Galileu Galilei*, Portugália Editora, Lisboa, 1966

- **BARBER, B.**, *Resistance by scientists to scientific discovery*, Science, 134, pp. 596-602, 1961
- **BARBERO, L.**, *Didáctica de la Física*, Edelvives / Universidad Zaragoza, 1979
- **BARNES, G.**, *Students' scores on Piaget-type questionnaires and after taking one semester of college physics*, American Journal of Physics, Aug. 1978
- **BARROW, L.**, *Elementary science textbooks and potencial Magnet Misconceptions*, School-Science-and-Mathematics, Vol. 90, N°8, pp. 716-720, Dec.1990.
- **BASSALO, J.**, *Materialismo e Idealismo em Física*, Gazeta de Física, Vol. 10, N° 3, pp. 81-92, 1987
- **BAUDOUIN, J.**, *Karl Popper*, Biblioteca Básica da Filosofia, Edições 70, 1989
- **BAUMAN, R.**, *Mass and Energy: The Low-Energy Limit*, The Physics Teacher Vol. 32, N° 6, pp. 340-343, Sept. 1994
- **BAUMAN, R.**, *Physics that textbook writers usually get wrong - I*, The Physics Teacher, Vol. 30, N° 5, May 1992
- **BAUMAN, R.**, *Physics that textbook writers usually get wrong - II*, The Physics Teacher, Vol. 30, N° 6, Sept. 1992
- **BAUMAN, R.**, *Physics that textbook writers usually get wrong - III*, The Physics Teacher, Vol. 30, N° 7, Octob. 1992
- **BELENKY, M.; CLINCHY, B.; GOLDBERGER, N.; TARULE, J.**, *Woman's Ways of Knowing*, Basic Books, New York, 1986
- **BENSON, G.**, *Epistemology and Science Curriculum*, Journal of Curriculum Studies, Vol. 21, N° 4, pp. 329-344, July-Aug. 1989
- **BERNARDINI, C.**, *O que é uma lei física*, Editorial Notícias, Lisboa, 1988
- **BEYSSADE, M.**, *Descartes*, Biblioteca Básica da Filosofia, Edições 70, 1991
- **BLACK, J.; HARDING, I.**, *Developing reading Skills in the High School Physics Class*, Physics Teacher, Vol. 19, N° 2, pp. 106-112, Feb.1981

- **BLACK, P.; SOLOMON, J.,** *Life-world and science world-pupils' ideas about energy*, *Entropy in the School*, Vol.1, Roland Eotvos Physical Society, Budapest, 1983
- **BLANCHÉ, A** *Epistemologia*, Editorial Presença, Lisboa, 1975
- **BLISS, J.; OGBORN, J.,** *Children's choices of uses of energy*, *European Journal of Science Education*, Vol. 7, Nº 2, pp. 195-203, 1985
- **BÓO, M.,** *The science background of primary teachers*, *School Science Review*, March 1989
- **BORN, M.; AUGER, P.; SCHRODINGER, E.; HEISENBERG, W.,** *Problemas da Física Moderna*, Editora Perspectiva, São Paulo, 1969
- **BOV, M.,** *The Science background of primary teachers*, *School Science Review*, Vol. 70, Nº 252, March 1989
- **BOWEN, B.,** Ithaca, N.Y., Unpublished Ph. D. thesis, Department of Education, Cornell, 1972
- **BOYD, R.; GASPER, P.; TROUT, J.,** *The Philosophy of Science*, The MIT press, 1991
- **BOYLE, R.; MALONEY, D.,** *Effect of written text on usage of Newton's third law*, *Research in Science teaching*, Vol. 16, Nº 2, pp. 123-139, 1991
- **BRADLEY, J.,** *Mach and the philosophy of science*, *School Science Review*, Vol. 72, Nº 261, pp. 35-37, June 1991
- **BRONOWSKI, J.,** *Ciência e valores humanos*, D. Quixote, Lisboa, 1972
- **BRONOWSKI, J.,** *Introdução à Atitude Científica*, Livros Horizonte, Lisboa, s/d
- **BROOK, A.,** *Children's understanding of ideas about energy: a review of the literature*, in *Proceedings of an Invited Conference «Energy Matters»*, University of Leeds, pp. 33-45, 1985
- **BROOK, A.; DRIVER, R.,** *Aspects of secondary students' understanding of energy*, Edit. Driver and Millar, University of Leeds, 1984
- **BROTAS, A.,** *O essencial sobre a Teoria da Relatividade*, INCM, Lisboa, 1988

- **BROWN, D.,** *Students' concept of force: the importance of understanding Newton's third law*, Physics Education, Vol. 24, pp. 353-358, 1989
- **BROWN, G.,** *Towards a Sensible Definition of Weight*, School Science Review, Nº 162, March 1966
- **BUNGE, M.,** *Filosofia da Física*, Edições 70, Lisboa, 1973
- **CACHAPUZ, A.,** *O ensino das ciências para a excelência da aprendizagem*, em Novas Metodologias em Educação, Porto Editora, pp. 349-385, 1995
- **CACHAPUZ, A.; MARTINS, I.,** *High School student's ideas about energy of chemical reactions*, in Proceedings of the Second International Seminar- Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics, pp. 60-66, Ithaca, NY, Cornell University, 1987
- **CACHAPUZ, A.; MALAQUIAS, I.; MARTINS, I.; PEDROSA, M.; LOUREIRO, M.; THOMAZ, M.; COSTA, N.,** *Concepções alternativas em Física de professores estagiários*, comunicação OR-8 do 1.º Encontro Ibérico sobre Enseñanza de la Física, Universidad de Valladolid, Sep. 1991
- **CALDEIRA, M.; COSTA, E.; PATRÍCIO, A.; PINTO, A.; RUIVO, M.; PINA, E.; THOMAZ, M.,** *Os conceitos de som dos alunos da escola secundária*, comunicação P-27 do 1.º Encontro Ibérico sobre Enseñanza de la Física, Universidad de Valladolid, Sep. 1991
- **CALDEIRA, M.; COSTA, M.; PATRÍCIO, M.; PINA, E.; RUIVO, M.; THOMAZ, M.,** *Ensino-Aprendizagem do conceito de som: uma estratégia de abordagem*, Comunicação IXP 4 do 2º Encontro Ibérico para o Ensino de Física, UTAD, Vila Real, Set. 1992
- **CALDEIRA, M.; MARTINS, D.,** *Calor e Temperatura. Que noção têm os alunos universitários destes conceitos?*, Gazeta de Física, Vol. 13, Fasc. 2, 1990
- **CARAÇA, B.,** *Conceitos Fundamentais da Matemática*, Ed. Biblioteca Cosmos, Lisboa, 1975
- **CARAÇA, B.,** *Conferências e Outros Escritos*, Ed. Biblioteca Cosmos, Lisboa, 1978

- **CARAMAZZA, A.; McCLOSKEY, M.; GREEN, B.,** *Naive beliefs in “sophisticated” subjects: misconceptions about trajectories of objects*, Cognition, Nº9, pp. 117-123, 1981
- **CARLOS, R.; MARTINHO, E.; VALADARES, J.,** *Ponto de Física do 12º ano - Soluções “oficiais” e soluções correctas*, Gazeta de Física, Vol. 8, Fasc.4, pp. 149-152, 1985
- **CARMICHAEL, P.; DRIVER, R.; HOLDING, B., PHILLIPS, I.; TWIGGER, D.; WATTS, M.,** *Research on students’ conception in science: a bibliography*, University of Leeds, 1990
- **CARNOT, S.,** *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*, Alianza Editorial, Madrid, 1987
- **CASINI, P.,** *As Filosofias da Natureza*, Editorial Presença ,1979
- **CELLERIER, G.,** *Piaget*, Biblioteca Básica da Filosofia, Edições 70, Lisboa, 1991
- **CERVO, A.; BERVIAN, P.,** *Metodologia Científica*, Editora Mc Graw-Hill, 1977
- **CHAMPAGNE, A.; KLOPPER, L.; ANDERSON, J.,** *Factors influencing the learning of classical mechanics*, American Journal of Physics., Vol. 48, Nº 12, pp. 1074-1079, Dec. 1980
- **CLARAMONTE, J.,** *Introducción a la didáctica de la Física*, Ed. Vicens-vives, Barcelona, 1972
- **CLATWORTHY, G.,** *Towards a sensible definition of weight*, School Science Review, Nº 161, pp. 236-238, Nov 1965
- **CLEMENT, J.,** *Catalogue of student’s conceptual models in Physics: section 1 - movement and force*, Technical report, University of Massachusetts at Amherst, 1977
- **CLEMENT, J.,** *Mapping a student’s causal conceptions from a problem-solving protocol*, in Cognitive Process Instrution, Philadelphia, Franklin Institute Press, pp. 133-146, 1979

- **CLEMENT, J.**, American Association of Physics Teacher, Announcer, 9, 79, 1979
- **CLEMENT, J.**, *Analogy generation in scientific problem solving*, Proceedings of Third Annual Meeting of the Cognitive Science Society, 1981
- **CLEMENT, J.**, *Students' preconceptions in introductory mechanics*, American Journal of Physics, Vol. 50, Nº 1, pp. 66-71, Jan. 1982
- **CLEMENT, J.**, *Overcoming Students' misconceptions in Physics: the role of anchoring institutions and analogical validity*, In Proceedings of the Second International Seminar: Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics, 1989
- **CLOSKEY, M.; CARRAMAZZA, A.; GREEN, B.**, *Curvilinear motion in the absence of external forces: Naive beliefs about the motion of objects*, Science, Vol. 210, pp. 1139-1141, 1980
- **COHEN, I.**, *La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas*, Alianza Editorial, Madrid, 1983
- **COHEN, I.**, *Revolution in Science*, Harvard University press, 1985
- **COHEN, I.**, *O Nascimento de uma Nova Física*, Ed. Gradiva, Lisboa, 1988
- **COLBECK, J.**, *New definitions of force and mass*, School Science Review, Nº 167, p. 269, Nov. 1967
- **COLBECK, J.** *A new definition of force*, School Science Review, Nº 169, p. 932, June 1968
- **COLLINS, H.**, *Stages in the Empirical program of relativism*, Social Studies of Science, 11, 1981
- **COLLINS, H.**, *The role of the core-set in modern Science: social contingency with methodological propriety in science*, History of Science, 19, 1981
- **COPÉRNICO, N.**, *As Revoluções dos Orbes Celestes*, Fundação Calouste Gulbenkian, 1984
- **CORDON, J.; MARTINEZ, T.**, *História da filosofia-os filósofos, os textos*, 1º volume, Edições 70, Lisboa 1985

- **CORDON, J.; MARTINEZ, T.,** *História da filosofia-os filósofos,os textos*, 2º volume, Edições 70, Lisboa 1984
- **CORDON, J.; MARTINEZ, T.,** *História da filosofia-os filósofos,os textos*, 3º volume, Edições 70, Lisboa 1987
- **COSTA, A.,** *Introdução à História e Filosofia das Ciências*, Publicações Europa América, Lisboa, 1986
- **COSTA, A.,** *Geocentrismo, Antropocentrismo e Heliocentrismo*, boletim Química da Sociedade Portuguesa de Química, 47, pp. 30-39, 1992
- **COUDERC, P. ,** *La Relativité*, Col. que sais-je?, P.U.F., 16ª ed. , 1977
- **COUDERC, P.; PERRIN, F.,** *A Relatividade*, edições 70, Lisboa, 1984
- **COUNY, H. ,** *Albert Einstein e a relatividade*, ed. Ulisseia, Lisboa, 1965
- **COX, K.,** *Mass and weight*, School Science Review, Nº 212, p. 591, March 1979
- **CRAWLEY, F.; ARDITZOGLOU, S.,** *Life and Physical Science Misconceptions of Preservice Elementary Teachers*, Paper presented at the Annual Meeting of the School Science and Mathematics Association, Austin, Texas, Dec. 1988
- **CRESSON, A.,** *Aristóteles*, Biblioteca Básica da Filosofia, Edições 70, 1988
- **CROCA, J.,** *Causalismo versus indeterminismo na Física contemporânea*, revista Vértice, pp. 61-70, Lisboa, Set. 1990
- **CUERVA, J.; OTERO, J.,** *Análisis del conflicto cognitivo en la adquisición de información científica inconsistente con el conocimiento previo*, Comunicação B2-2 do 5º Encuentro Ibérico para la Enseñanza de la Física, Universidade de Santiago de Compostela, Sep. 1995
- **D'ESPAGNAT, B.; KLEIN, E.,** *Olhares sobre a Matéria, dos Quanta e das Coisas*, Instituto Piaget, Lisboa, 1994
- **DAGHER, Z.,** *On the Unique Features of Teacher Analogies in Science Classrooms*, symposium «Ensino das Ciências e da Matemática», Lisboa, Junho1993

- **DAGOGNET, F.**, *Bachelard*, Biblioteca Básica da Filosofia, Edições 70, Lisboa, 1986
- **DAMÁSIO, A.**, *O Erro de Descartes, Emoção, razão e cérebro humano*, Forum da Ciência, Publicações Europa América, Julho 1995
- **DAMPIER, W.**, *História da Ciência*, IBRASA, São Paulo, 1986
- **DAVIS, N.; McCARTY, B.; SHAW, K.; SIDANI-TABBAA, A.**, *Transitions from objectivism to constructivism in science education*, International Journal of Science Education, Vol.15, Nº 6, Nov.-Dec. 1993
- **DEBUS, A.**, “*Tradition and Reform*” e “*The Chemical Key*”, Man and Nature in the Renaissance, Cambridge University Press, New York, pp. 1-33, 1978
- **DEESON, E.**, *Weight-confusion and more confusion*, School Science Review, Nº 187, Dec. 1972
- **DESCARTES, R.**, *Discurso do Método*, Edições 70, Lisboa, 1991
- **DESCARTES, R.**, *Princípios da Filosofia*, Guimarães Editores, Lda, Lisboa, 1989
- **DI SESSA, A.**, *Unlearning Aristotelian physics: A study of knowledge-based learning*, Cognitive Science, pp. 37-75, 1982
- **DOING SCIENCE: IMAGES OF SCIENCE IN SCIENCE EDUCATION**, Ed. Robin Millar, The Falmer Press, London, 1989
- **DOMÉNECH, A.; CASASÚS, E.; DOMÉNECH, M.**, *The classical concept of mass: theoretical difficulties and students' definitions*, International Journal of Science Education, Vol. 15, Nº2, Março-Abril, 1993
- **DOMINGUEZ, J.; GARCIA, E.; ILLOBRE, M.**, *Interpretando fenómenos macroscópicos con partículas microscópicas. Dilatación e temperatura*, Comunicação B2-8 do 5º Encontro Ibérico para la Enseñanza de la Física, Universidade de Santiago de Compostela, Sep. 1995
- **DOW, W.; AULD, J.; WILSON, D.**, *Pupils' concepts of gases, liquids and solids*, An investigation into the teaching of the particulate nature of matter, Dundee College of Education, Dundee, 1978

- **DRAKE, S.**, *Cause, Experiment and Science*, University of Chicago, Chicago, 1981
- **DRAKE, S.**, *Galileu*, Publicações Dom Quixote, Lisboa, 1981
- **DRIVER, R.**, *The representation of conceptual frameworks in young adolescent science students*, Doctoral Dissertation, University of Illinois, 1973
- **DRIVER, R.**, *Pupil' s alternative frameworks in science*, European Journal of Science Education, 3, 93, 1981
- **DRIVER, R.**, *The Pupil as Scientist*, Open University Press, London, 1^a ed., 1983
- **DRIVER, R.**, *The Pupil as Scientist*, Open University Press, London, 1988
- **DRIVER, R.**, *Theory into Practice II: A Constructivist Approach to Curriculum Development*, in *Development and Dilemmas in Science Education*, ed. Peter Fensham, The Falmer Press, pp. 133-149, London, 1988
- **DRIVER, R.**, *The Construction of Scientific Knowledge in School Classrooms*, in *Doing Science: Images of Science in Science Education*, ed. Robin Millar, The Falmer Press, pp. 83-105, London, 1989
- **DRIVER, R.; ERICKSON, G.**, *Theories-in-action: some theoretical and empirical issues in the study of student's conceptual framework in science*, Studies in Science Education, 10, pp. 37-60, 1983
- **DRIVER, R., GUESNE, E., TIBERGHEN, A.**, *Children's Ideas in Science*, Milton Keynes, Open University Press, 1985
- **DRIVER, R.; MILLAR, R.**, *Teaching energy in schools: towards an analysis of curriculum approaches*, in *Energy Matters*, Proceedings of an invited conference, University of Leeds, pp. 9-24, 1985
- **DRIVER, R.; OLDHAM, V.**, *A Constructivist Approach to Curriculum Development in Science*, Studies in Science Education, N° 13, pp. 105-122, 1986
- **DRIVER, R.; SQUIRES, A.; RUSHWORTH, P.; ROBINSON, V.**, *Making Sense of Secondary Science*, Routledge, Londres 1994

- **DUIT, R.**, *Students notions about the energy concept before and after Physics instruction*, in Proceedings of the international workshop on «Problems Concerning Students' Representation of Physics and Chemistry Knowledge», Ludwigsburg, Germany, ed. Jung, Pfundt and Rnoneck, pp. 268-319, 1981
- **DUIT, R.**, *Understanding energy as a conserved quantity- remarks on the article by R.Sexl*, European Journal of Science Education, vol. 3, Nº 3, pp. 291 a 301, 1981
- **DUIT, R.**, *Learning the energy concept in school - empirical results from the Philippines and West Germany*, Physics Education, vol. 19, pp. 59-66, 1984
- **DUIT, R.**, *In search of an energy concept*, in Energy Matters, Proceedings of an Invited Conference, University of Leeds, pp. 67-101, 1985
- **DRIVER, R.; WARRINGTON, L.**, *Students' use of the principle of energy conservation in problem situations*, Physical Education, 1985
- **DUIT, R.; KESIDOU, S.**, *Students' Conceptions of Basic Ideas of the Second Law of Thermodynamics*, Paper presented at the Annual Meeting of the National Association for research in Science Teaching, Atlanta, April 1990
- **DUNKIN, M.; BIDDLE, B.**, *The Study of Teaching*, Holt, Rinehart and Winston, New York, 1974
- **DURANT, W.**, *História da Filosofia*, Edição Livros do Brasil, Lisboa, s/d
- **DUSCHL, R.; HAMILTON, R.; GRANDY, R.**, *Psychology and epistemology: match or mismatch when applied to science education?*, International Journal of Science Education, Vol.12, Nº. 3, 1990
- **EINSTEIN, A.** , *Notas autobiográficas*, Alianza Editorial, Madrid, 1984
- **EINSTEIN, A.** , *O significado da Relatividade*, Ed. Arménio Amado, Coimbra, 1958
- **EINSTEIN, A.** , *Sobre la teoria de la relatividad especial y general*, Alianza Editorial, Madrid, 1984
- **EINSTEIN, A.**, *Como vejo o Mundo*, Editora Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1993.

- **EINSTEIN, A.**, *Conceptions Scientifiques*, Flammarion, 1990
- **EINSTEIN, A.**, *O significado da Relatividade*, Editor Arménio Amado, Coimbra, 1958
- **EINSTEIN, A.**, *Textos Fundamentais da Física Moderna, 1º Volume - O princípio da Relatividade*, F. Calouste Gulbenkian, 1972
- **EINSTEIN, A.; INFELD, L.**, *A Evolução da Física*, Livros do Brasil, Lisboa, s/d
- **EINSTEIN, A.; INFELD, L.**, *A Evolução da Física*, Biblioteca de cultura científica, Editores Zahar, Rio de Janeiro, 1966
- **EINSTEIN, A.; INFELD, L.**, *A Evolução da Física*, Livros do Brasil, s/d
- **EINSTEIN, A.**, *Sobre la teoria de la relatividad especial y general*, Alianza Editorial, Madrid, 1984
- **ENOCHS, L.; GABEL, D.**, *Preservice Elementary Teachers' Conceptions of* Volume, School Science and Mathematics, Vol. 84, Nº 8, pp. 670-680, Dec. 1984
- **ERICKSON, G.**, *Children's Conceptions of Heat and Temperature*, Science Education, Vol. 63, Nº 2, pp. 221-230, 1979
- **ESPAGNAT, B.; KLEIN, E.**, *Olhares Sobre a Matéria*, Instituto Piaget, Lisboa 1992
- **EVERTSON, C.; ANDERSON, C.; ANDERSON, L.; BROPHY, J.**, *Relationships between classroom behaviour and student outcomes in junior high mathematics and English classes*, American Educational Research Journal, Vol. 17, pp. 43-60, 1980
- **FAURE, P.**, *O Renascimento*, Publicações Europa-América, 1977
- **FAVIERES, A.; MANRIQUE, M.; LANDAZÁBAL, M.; CARMEN, M.; VARELA, P.**, *Una introducción al concepto de energía basada en las ideas previas de los estudiantes*, comunicação OR-25 do 1.º Encuentro Ibérico sobre Enseñanza de la Física, Universidad de Valladolid, Sep. 1991
- **FEHER, E.**, *Conceptions of Light and Vision: From the Naive to the Expert*, Paper presented at the Annual Meeting of the American Association of Physics Teachers, Atlanta, Jan. 1986

- **FENSHMAN, P.**, *Developmente and Dilemmas in Science Education*, The Falmer Press, 1988
- **FEYERABEND, P.**, *Adeus à Razão*, Edições 70, Lisboa, 1991
- **FEYERABEND, P.**, *Contra o Método*, Relógio d'Água, Lisboa, 1993
- **FEYNMAN, R.**, *The Feynman Lectures of Physics*, Ed. Fondo Educativo Interamericano, S.A., Vol 1 - Mecânica, radiação e calor, Bogota, 1971
- **FINEGOLD, M.; GORSKY, P.**, *Students' concepts of force as applied to related physical systems: A search for consistency*, International Journal of Science Education, Vol. 13, Nº 1, January-March 1991
- **FISCHBACH, G.**, *Mind and Brain*, Scientific American, Special Issue, pp. 24-33, Set. 1992
- **FISHER, K.; LIPSON, J.**, *Twenty Questions About Student Errors*, Journal of Research in Science Teaching, vol. 23, Nº. 9, pp. 783-803, 1986.
- **FOGDEN, M.**, *Towards a sensible definition of weight*, School Science Review, Nº 165, p. 587, March 1967
- **FORMIGARI, L.**, *O mundo depois de Copérnico*, Edições 70, Lisboa, 1984
- **FORMOSINHO, S.**, *O Imprimatur da Ciência - das razões dos homens e da natureza na mudança científica*, Coimbra Editora, 1994
- **FORMOSINHO, S.**, *Uma perspectiva Heurística para o ensino da Química*, Revista Portuguesa de Química, 1987
- **FOX, D.**, *Weight-an operational definition*, School Science Review, Nº188, p. 602, March 1973
- **FRANKSEN, O.**, *H.C. Ørsted-a man of two cultures*, Bang & Olufsen, Denmark, 1981
- **FREMLIN, R.**, *Weightlessness*, School Science Review, Nº 187, Dec. 1972
- **FRENCH, A.**, *Are the textbook writers wrong about capacitors?*, The Physics Teacher, Vol 31, 3, pp. 156-159, 1993
- **FRENCH, A.**, *Relatividade Especial- MIT Physics Course*, Ed. Reverté, Barcelona, 1988

- **FU, Y.**, *Students' Understanding of the Magnetic Field of a Circular Current Loop*, Physics-Education, Vol. 25, N° 6, pp. 325-327, Nov.1990
- **FULLER, R.; KARPLESS, R.; LAWSON, A.**, Physics Today, Vol. 30, n° 23, 1977
- **FURIO, C.; HERNÁNDEZ, J.**, *Ideas sobre los gases en alumnos de 11 a 15 años*, Enseñanza de las Ciências, 1, 2, pp. 83-92, 1983
- **GAILIUNAS, P.**, *Is energy a thing? Some misleading aspects of scientific language*, School Science Review, March 1988
- **GALILEU-KEPLER**, *El Mensaje y el mensajero sideral*, Alianza Editorial, Madrid, 1984
- **GALILI, I.**, *Weight and Gravity: teachers' ambiguity and students' confusion about concepts*, International Journal of Science Education, Vol. 15, N° 2, March-April, pp. 149-162, 1993
- **GAMBLE, R.**, *Force*, Physics Education, vol. 24, pp. 79-82, 1989
- **GAMOW, G.**, *The great Physicists from Galileu to Einstein*, Dover Publications, 1981
- **GARDNER, E.**, *A new definition of force*, School Science Review, N° 169, pp. 932-933, June 1968
- **GARDNER, H.**, *The unschooled mind*, Fontana Press, London, 1993
- **GAROFALO, J.; LINDGREN, R.; O'NEILL, T.**, *Knowledge Developed by a High School Teacher Participating in a Physics Research Experience*, Science Teacher Education, Vol. 76, N° 1, pp. 42-50, 1992
- **GAULD, C.**, *The "pupil-as-scientist" metaphor in science education*, Paper presented at the 19th Annual Conference of the Australian Science Education Research Association, University of New South Wales, Sydney, July 1988
- **GAULD, C.**, *A study of Pupils' Responses to Empirical Evidence*, in Doing Science: Images of Science in Science Education, ed. Robin Millar, The Falmer Press, pp. 62-81, 1989

- **GAYFORD, C.**, *Some aspects of the problems of teaching about energy in school biology*, European Journal of Science Education, Vol. 8, Nº 4, pp. 443-450, 1986
- **GEYMONAT, L.**, *Elementos de Filosofia da Ciência*, Gradiva-publicações, Lisboa, s/d.
- **GEYMONAT, L.**, *O pensamento científico*, Ed. Arcádia, Lisboa, 1961
- **GIERE, R.**, *Explaining Science - A cognitive approach*, The University of Chicago Press, 1988
- **GIERE, R.**, *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, Volume XV, University of Minnesota Press, 1992
- **GIL, D., CARRASCOSA, J., FURIÓ, C., MTNEZ-TORREGROSA, J.**, *La Enseñanza de las Ciencias en la Educación Secundaria*, Ice - Horsori, Barcelona 1991
- **GIL, D.; SOLBES, J.**, *The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science*, International Journal of Science Education, Vol. 15, 3, pp. 255-260, 1993
- **GILBERT, J.; OSBORNE, R.**, *I understand, but I don't get it: Some problems of learning science*, School Science Review, pp. 664-674, 1979
- **GILBERT, J.; OSBORNE; R., FENSHAM, P.**, *Children's science and its consequences for teaching*, Science Education, Vol. 66, Nº 4, pp. 623-633, 1982.
- **GILBERT, J.; POPE, M.**, *Schoolchildren discussing energy*, Institute of Educational Development, University of Surrey, 1982
- **GILBERT, J.; POPE, M.**, *Small group discussions about conceptions in science: a case study*, Research in Science and Technological Education, vol. 4, nº 1, pp. 61--76, 1986
- **GILBERT, J., WATTS, D.**, *Concepts, Misconceptions and Alternative Conceptions: Changing Perspectives*, Science Education, 10, pp. 61-98, 1983.
- **GILBERT, J.; WATTS, D.; OSBORNE, R.**, *Student's conceptions of ideas in mechanics*, Physics Education, Nº 313, pp. 62-66, 1982

- **GONÇALVES, R.**, *Ciência/ Pós-Ciência/ Meta-Ciência/ Tradição, Inovação e Renovação*, Discórdia Editores, Lisboa, 1991
- **GONSETH, F.**, *La Métaphysique et l'Ouverture à l'Expérience*, Paris, P.U.F., 1960
- **GONZALEZ, A.**, *Aproximación a la Física*, Mondadori, Madrid, 1988
- **GONZÁLEZ, C.**, *Mass and Weight*, School Science Review, Nº 193, p. 840, June 1974.
- **GORODETSKY, M.; HOZ, R.; VINNER, S.**, *Hierarchical solution models of speed problems*, Science Education, Vol. 70, pp. 565-582, 1986
- **GOULD, S.**, *La falsa medida del hombre*, Bosch, Barcelona, 1981 a 1984
- **GOULD, S.**, *The Mismeasure of Man*, W. W. Norton, Nueva York, 1981
- **GOWIN, D.**, *Educating*, Cornell University Press, Ithaca, 1990
- **GRAY, B.**, *Units of force*, School Science Review, 221, June 1981
- **GREEN, J.**, *Quantum physics and reality*, School Science Review, Vol. 74, Nº 267, pp.37-42, Dec. 1992
- **GREGORY, R.**, *Mind in Science*, Penguin Books, London, 1981
- **GUAYDIER, P.**, *História da Física*, Edições 70, Lisboa, 1984
- **GUIDONI, P.**, *A phenomenological approach to the development and differentiation of energy ideas*, in Energy Matters, Proceedings of an invited conference, University of Leeds, pp. 103-132, March 1985
- **GUNSTONE, R.; NORTHFIELD, J.**, *Inservice Education: Some Constructivist Perspectives and Examples*, 1988
- **GUNSTONE, R.; WATTS, M.**, *Force and Motion*, in Driver, Guesne, Tiberghien, A., *Children's Ideas in Science*, Milton Keynes, Open University Press, 1985
- **GUTHRIE, W.**, *Os Filósofos Gregos de Tales a Aristóteles*, Editorial Presença, Lisboa, 1987
- **HAISCH, B.; RUEDA A.;PUTHOFF,H.**, *Beyond $E = mc^2$* , The Sciences, Nov.-Dec. 1994

- **HALBWACHS, F.**, *La Pensée Physique Chez L'Enfant et le Savant*, Ed. Delachamy et Niestlé, 1974
- **HALL, A.; HALL, M.**, *A Brief History of Science*, Iowa State University Press, 1988
- **HARMES, N.; YAGER, R.**, *What Research Says to the Science Teacher*, Vol. 3, National Science Teachers Association, Washington, 1981
- **HASHWEH, M.**, *Effects of Subject-Matter Knowledge in the teaching of Biology and Physics*, Paper presented at the Annual Meeting of the American Educational Research Association, San Francisco, April 1986
- **HASLETT, J.**, *Textbook misquotations of de Broglie*, American Journal of Physics, vol. 60, 7, 1992
- **HEATH, N.**, *Heating*, Physics Education, 11, 389, Sept. 1976
- **HEATH, N.**, *Energy and heating*, Physics Education, 18, 106, 1983
- **HEISENBERG, W.**, *A imagem da Natureza na Física Moderna*, Edição Livros do Brasil, Lisboa, s/d.
- **HEISENBERG, W.**, *Diálogos sobre física atômica*, Editorial Verbo, Lisboa, 1971
- **HEISENBERG, W.**, *Physics and Beyond*, Allen and Uwin, London, 1971
- **HEISENBERG, W.**, *Páginas de reflexão e auto-retrato*, Gradiva, Junho 1990
- **HELM, H.**, *Misconceptions in Physics amongst South African Students*, Physics Education, Vol.15, Nº 2, March 1980
- **HELSDON, R.**, *A new definition of force*, School Science Review, Nº 165, pp. 544-548, March 1967
- **HELSDON, R.**, *New definitions of force and mass*, School Science Review, Nº167, pp. 270-271, Nov. 1967
- **HESSEN, J.**, *Teoria do conhecimento*, Arménio Amado Edit., Coimbra, 1987
- **HEWSON, M.**, *The acquisition of scientific knowledge: analysis and representation of student conceptions concerning density*, Science Education, 70, pp.159-170, 1986

- **HEWSON, P.; HEWSON, M.,** *Science teachers' conceptions of teaching: Implications for teacher education*, International Journal of Science Education, Vol.9, No. 4, July-Sept., pp. 425-440, 1987
- **HIERREZUELO, J.; MONTERO, A.,** *La Ciencia de los alumnos*, Laia Barcelona, 1988
- **HOLMAN, J.,** *Teaching about energy - the chemical perspective*, in *Energy Matters*, Proceedings of an invited conference, University of Leeds, pp. 45-52, March 1985
- **HOLTON, G.,** *Introducción a los Conceptos y Teorías de las Ciencias Físicas*, Editorial Reverté, S.A., 1989.
- **HORSFIELD, E.,** *Aspects of scientific method in the natural sciences-physics*, American Journal of Physics, Vol. 52, N° 9, pp. 809-814, Sept 1984
- **IMBERT, C., ZASLAWSKY, D., JACQUES, F., ARMENGAUD, F., GRANGER, G., DEVAUX, P., SEBESTIK, J.,** *Filosofia Analítica*, Gradiva-publicações, Lisboa, s/d.
- **INEA/FQ,** *O Ensino - Aprendizagem da Física e da Química: Resultados Globais de um Questionário a Professores*, Universidade de Aveiro, 1989
- **INFELD, L. ,** *Albert Einstein*, Pub. Europa-América, Lisboa, s/d
- **ITARD. J.; LÉVY, J.; MORAZÉ, C.; TATON, R.; TONNELAT, M.,** *O Século XIX, A Ciência Contemporânea*, Vol. III, Difusão Europeia do Livro, São Paulo, 1966
- **JAMIN, M.; BOUTY, M.,** *Cours de Physique de L'École Polytechnique*, Gauthier-Villars, Paris, 1886
- **JAMMER, M.,** *Concepts of Mass in classical and modern physics*, Harvard University Press, Cambridge, 1961
- **JANGLEBERT, J.,** *Physique*, 51^e edit., Imprimer et Livre Classiques, Paris, 1896
- **JONES, D.,** *Teaching Modern Physics - Misconceptions of the Photon That Can Damage Understanding*, Physics-Education, Vol. 26, N° 2, pp. 93-98, March 1991

- **JONES, G.**, *Why can't we loose "weight"*, School Science Review, N° 191, p. 418, Dec. 1973
- **KANT, I.**, *Crítica da razão pura*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1994
- **KANT, I.**, *Princípios Metafísicos da Ciência da Natureza*, Edições 70, 1990
- **KARLIS, F.**, *Inertia Demonstration Revisited*, American Journal of Physics, Vol. 46, N° 7, pp. 710-713, July 1978
- **KASSIM, A.; MASKILL, R.**, *Problems in the descriptive observation of concept teaching in science classroom*, International Journal of Science Education, Vol.12, N° 2, April - June 1990.
- **KELLY, J.**, *The Psychology of Personal Constructs*, New York, W.W. Norton and Co., Vols 1 e 2, 1955.
- **KEPLER, J.**, *El secreto del universo*, Alianza Editorial, Madrid, 1992
- **KING, A.**, American Journal of Physics, Vol 30, N° 387, 1962
- **KINGSLEY, G.**, *Weight and mass - some further confusion*, School Science Review, n° 185, pp 446-447, Dec. 1971
- **KIRCHER, E.**, *Research in the classroom about the particle nature of matter*, in Proceedings of the international workshop on "Problems Concerning Students' Representations of Physics and Chemistry Knowledge", Ludwigsburg: Paedagogische Hochschule, 1981
- **KIRKWOOD, V.; CARR, M.; McCHESNEY, J.**, *LISP (Energy)- Some preliminary findings*, Research in Science Education, Vol.16, pp. 175-183, 1986
- **KITTEL, C.; KNIGHT, W.; RUDERMAN, M.**, *Curso de Física de Berkeley, Volume 1, Mecânica*, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1973
- **KOYRÉ, A.**, *Considerações sobre Descartes*, Editorial Presença, Lisboa, 1986
- **KOYRÉ, A.**, *Do mundo fechado ao universo infinito*, Publicações Gradiva, Lisboa, s/d
- **KOYRÉ, A.**, *Estudos galilaicos*, Publicações Dom Quixote, Lisboa, 1992
- **KOYRÉ, A.**, *Galileo y la Revolución científica del siglo XVII*, Texto de uma conferência pronunciada en el Palais de la Découverte el 7 de Maio de 1955

- **KOYRÉ, A.**, *Galileu e Platão*, Editora Gradiva, Lisboa, s/d
- **KRUGER, C.**, *Some Primary Teachers' Ideas about Energy*, Physics-Education, Vol. 25, Nº 2, pp.86-91, March 1990
- **KRUGER, C.; PALACIO, D.; SUMMERS, M.**, *A survey of Primary school teachers' conceptions of force and motion*, *Educational Research*, Vol 32, Nº 2, pp. 83-95, 1990
- **KRUGER, C.; SUMMERS, M.**, *An investigation of some primary teachers' understanding of the concepts force and gravity*, Primary School Teaching and Science Project, University of Oxford, Department of Educational Studies, 1988
- **KRUGER, C.; SUMMERS, M.**, *Primary school teachers' understanding of science concepts*, *Journal of Education for Teaching*, Vol.14, Nº3, pp. 259-265, 1988
- **KRUGER, C.; SUMMERS, M.**, *An investigation of some primary teachers' understandings of changes in materials*, *School Science Review*, Vol. 71, Nº 255, pp. 17-27, Dec. 1989
- **KUHN, T.**, *A revolução Copernicana*, Edições 70, Lisboa, 1990
- **KUHN, T.**, *The Structure of Scientific Revolutions*, The University of Chicago Press, 2ª ed, 1970
- **KUIPER, J., MONDLANE, E.**, *Students ideas of science concepts: alternative frameworks?*, *International Journal of Science Education*, Vol. 16, No.3, pp. 279-292, May-June, 1994
- **KUZNETSOV, B.**, *Albert Einstein*, 2 vol, Ed. Presença, Lisboa, s/d
- **LA TEORIA DE LA RELATIVIDAD**, *Selección de L. Pearce Williams*, Alianza Universidad, Madrid, 1984
- **LAKATOS, I.**, *O Falseamento e a metodologia dos programas de pesquisa científica*, in *A Crítica e o Desenvolvimento do Conhecimento*, Ed. Cultrix, S. Paulo, 1979
- **LANDAU, L. ; RUMER, Y.**, *O que é a relatividade?*, Portugália Edit., Lisboa, 1965

- **LANGEVIN. P.**, *Pensamento e Acção*, Seara Nova, Lisboa, 1974
- **LANGLEBERT, J.**, *Physique*, Imprimerie et Librairie Classiques, Paris, 1896
- **LARSSON, S.**, *Paradoxes in Teaching*, Instructional-Science, Vol.12, N°4, pp. 355 a 365, Dec. 1983
- **LASZLO, E.**, *Nas Raízes do Universo*, Instituto Piaget, Lisboa 1993
- **LATAS, S.; THOMAZ, M.**, *Concepções de alunos universitários sobre calor, temperatura e conceitos relacionados*, Comunicação PE 19 do 4º Encontro Ibérico para o Ensino da Física, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Set. 1994
- **LAUDAN, L.**, *Progress and its problems*, Berkeley, University of California Press, 1977
- **LAWSON, R.; McDERMOTT, L.**, *Student understanding of the work-energy and impulse-momentum theorems*, American Journal of Physics, Vol. 55, N° 9, pp. 811-817, Sept. 1987
- **LAWSON, R.; SCHUSTER, D.; McDERMOTT, L.**, *Student conceptions of force*, Annual meeting of American Association of Physics Teachers, New York, 1981
- **LAWSON, R.; TROWBRIDGE, D.; McDERMOTT, L.**, *Students' conceptions of dynamics*, Meeting of the American Association of Physics Teachers, Chicago, Illinois, 1980
- **LEDERMAN, N.**, *Students' and Teachers' Conceptions of the Nature of Science - A review of the Research*, Journal of Research in Science Teaching, Vol. 29, N° 4, pp. 331-359, 1992
- **LEDERMAN, N.; ZEIDLER, D.**, *Science Teachers' Conceptions of the Nature of Science: Do They Really Influence Teaching Behavior?*, Science Education, Vol. 71, N° 5, pp. 721-734, Oct. 1987
- **LEFEBVRE, H.**, *Lógica formal, lógica dialéctica*, Civilização Brasileira/DIFEL, 1983

- **LEITE, M.; SANTOS, A.; ESQUÍVEL, M.; MOURO, F.; ARCHER, L.; MONTEIRO, L.; FREITAS, A.; OLIVREIRA, J.; PERES, J.; PEREIRA, L.,** *Pensar a Ciência*, Gradiva, Lisboa 1988
- **LEMEIGNAN, G., BARAIS, A.,** *A developmental approach to cognitive change in mechanics*, International Journal of Science Education, Vol.16, Nº.1, pp. 90-120, Jan.-Feb. 1994
- **LEROY, A.,** *Locke*, Biblioteca Básica da Filosofia, Edições 70, Lisboa 1985
- **LINN, M.,** *Establishing a Research Base for Science Education: Challenges, Trends and Recommendations*, National Science Foundation, Berkeley, 1986
- **LLORENS, J.,** *La concepción corpuscular de la materia. Obstáculos epistemológicos y problemas de aprendizaje*, Investigación en la Escuela, Nº 4, pp. 33-49, 1988
- **LLORENS, J.; LLOPIS, R.,** *Langage quotidien et acquisition des concepts scientifiques*, in Communication education et culture scientifiques et industrielles, Dixiemes Journées Internationales sur l'Education Scientifique, pp. 107-115, 1988
- **LOBO, V.,** *A passagem da corrente eléctrica num condutor electrolítico: esclarecimento de um conceito erroneamente interpretado em alguns círculos do ensino secundário*, Química, boletim da Sociedade Portuguesa de Química, 52, pp. 41-43, 1994
- **LOPES, J.; COSTA, N.,** *Construção de conceitos físicos: Identificação de fases de desenvolvimento de conceitos em mecânica*, Comunicação B2-5 do 5º Encontro Ibérico para la Enseñanza de la Física, Universidade de Santiago de Compostela, Sep. 1995
- **LORENTZ, H.,** *Fenómenos Electromagnéticos num sistema que se move com qualquer velocidade à da luz*, in Textos Fundamentais da Física Moderna, I volume, O Princípio da Relatividade, Fundação Calouste Gulbenkian, pp. 13-43, 1972
- **LURIA, LEONTIEV, VIGOTSKY E OUTROS,** *Psicologia e Pedagogia*, Vols 1 e 2, Editorial Estampa, Lisboa, 1991

- **LYONS, N.**, *Dilemmas of Knowing: Ethical and Epistemological Dimensions of Teachers' Work and Development*, Harvard Educational Review, Vol. 60, Nº 2, May, 1990
- **MACLEOD, R.**, *Towards a sensible definition of weight*, School Science Review, Nº 159, pp. 372-377, March 1965
- **MACLEOD, R.**, *Towards a sensible definition of weight*, School Science Review, Nº 164, pp. 250-251, Nov. 1966
- **MACLEOD, R.**, *Weight - some further confusion*, School Science Review, Nº 185, pp. 822-824, June 1972
- **MAIRE, G.**, *Platão*, Biblioteca Básica da Filosofia, Edições 70, Lisboa, 1991
- **MAK; S. ; YOUNG, K.**, *Misconceptions in the teaching of heat*, School Science Review, pp. 464-470, Mar.1987
- **MALONEY, D.**, *Forces as interactions*, The Physics Teacher, Sept. 1990.
- **MALONEY, D.**, *Rule-governed approaches to Physics - Newton's third Law*, Physics Education, Vol. 19, pp 37-42, 1984
- **MANUEL,M.; JORGE, A.**, *Da Epistemologia à Biologia*, Instituto Piaget, Edições Piaget, Lisboa, 1994
- **MARGENAU, H.**, *Os Elementos Metafísicos da Física*, Atlântida Editora, Coimbra, s/d
- **MARIN, N., BENARROCH, A.**, *A comparative study of Piagetian and constructivist work on misconceptions in science*, International Journal of Science Education, Vol. 16, Nº 1, pp. 1-15, Jan.- Feb. 1994
- **MARQUIT, E.**, *Philosophy of physics in general physics courses*, American Journal of Physics, Vol. 46, Nº 8, pp. 784-789, Aug. 1978
- **MARTINEZ, J.; BARBERO; L.**, *Estudio de validacion de un cuestionario exploratprio sobre ideas previas y errores conceptuales en mecanica*, comunicação OR-6 do 1.º Encontro Ibérico sobre Enseñanza de la Física, Universidad de Valladolid, Sep. 1991

- **MARTINHO, A.; ROSA, A.; ROXO, J.; GARRÃO, M.; CORREIA, M.; GOMES, M.; FONSECA, M.; BARBOSA, R.,** *A Natureza da Ciência*, Palestra, Revista de Pedagogia e Cultura, Ministério da Educação Nacional, 1970
- **MARTINS, I.,** *Contributos da investigação educacional para o ensino do tema “Energia de reacção química”*, Colóquio-debate “A energia, a Cultura e a Escola”, Lisboa, Junho 1991
- **MASKILL, R.; WALLIS, K.,** *Scientific thinking in the classroom*, School Science Review, 1982
- **MASON, S.,** *História da Ciência*, Editora Globo, Rio de Janeiro, 1962
- **McCLELLAND, J.,** *The teaching of energy*, School Science Review, nº 211, pp. 369-370, 1979
- **McCLELLAND, J.,** *Newton’s Laws: what Newton wrote*, School Science Review, Vol. 74, Nº 269, pp. 99-102, June 1993
- **McCLOSKEY, M.,** *Intuitive Physics*, Scientific American, pp. 114-122, 1983
- **McCLOSKEY, M.; CARAMAZZA, A.; GREEN, B.,** *Curvilinear Motion in the Absence of External Forces: Naive Beliefs About the Motion of Objects*, Science, Vol. 210, pp. 1139-1141, 18, Aug. 1980
- **McDERMOTT, L.,** *Critical Review of Research in the domain of mechanics, International Summer workshop: Research on Physics Education*, La Loude les Maures, France, pp. 139-182, June-July 1983
- **McDERMOTT, L.,** *Research on conceptual understanding in mechanics*, Physics Today, Vol. 37, pp. 24-32, July 1984
- **McINTOSH, W.; ZEIDLER, D.,** *Teachers’ Conceptions of the Contemporary Goals o Science Education*, Journal-of-Research-in-Science-Teaching, Vol. 25, Nº 2, pp.93-102, Feb. 1988
- **MINSTRELL, J.,** *Explaining the “at rest” condition of an object*, The Physics Teacher, Vol. 20, pp. 10-14, 1982

- **MONTANERO, M.; SUERO, M.; PÉREZ, A.; CALVO, J.; PEÑA, J.; RUBIO, S.,** *Naturaleza y coherencia de las concepciones espontaneas acerca del principio de accion y reaccion*, Comunicação IXO 11 do 2º Encontro Ibérico para o Ensino de Física, UTAD, Vila Real, Set. 1992
- **MOREIRA, A.,** *Principales tendencias y alternativas de innovación en la enseñanza de la física: el rol de la investigación y del professor como investigador en enseñanza*, “Primer Simposio Iberoamericano sobre la Enseñanza de la Física en el Nivel Médio”, Colômbia, Nov. 1991
- **MOREIRA, A.,** *O estado da arte na investigação em didáctica da Física*, Conferência inaugural do “III Encontro Ibérico sobre Ensino da Física”, Jaca, Espanha, 1993
- **MOREIRA, A.,** *Cambio conceptual: critica a modelos actuales y una propuesta a la luz de la teoria del aprendizaje significativo*, Trabajo presentado en el II Simposio sobre Investigación en Educación en Física, Argentina, 1994
- **MOREIRA, M.; BUCHWEITZ, B.,** *Novas Estratégias de Ensino e Aprendizagem*, Plátano - Edições Técnicas, Lisboa, 1993
- **MORIN, E,** *O Método -A natureza da Natureza*, Publicações Europa -América, Lisboa, 1977
- **MORIN, E.,** *O Problema Epistemológico da Complexidade*, Publicações Europa-América, Lisboa, s/d
- **MULLET, E.; GERVAIS, H.,** *Dinstinction between the concepts of weight and mass in high school students*, International Journal of Science Education, vol. 12, nº 2, April- June 1990
- **MUMBY, H.,** *Metaphor in the thinking of teachers: An exploratory study*, Journal of Curriculum Studies, 18, pp. 197-209, 1986
- **NEWTON, I.,** *El Sistema del Mundo*, Alianza Editorial, Madrid, 1983
- **NEWTON, L,** *Principia-princípios matemáticos de filosofia natural*, Nova Stella Editorial, São Paulo, 1990

- **NIEDDERER, H.**, *Alternative framework of students in Mechanics and Atomic Physics - Methods of research and results*, in Proceedings of the second international seminar, Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics, Cornell University, Ithaca, 1987
- **NOBRE, F.**, *Tratado de Physica Elementar*, Typo J. Mendonça, Porto, 1895
- **NOVAK, J.**, *A Theory of Education*, Cornell Univers. Press, Ithaca, 1977.
- **NOVAK, J.**, *Ayudar a los Alumnos a Aprender cómo Aprender-La Opinión de un Profesor-Investigador*, Artículo presentado en la inauguración del III Congreso sobre Investigación y Enseñanza de las Ciencias y las Matemáticas, Santiago de Compostela, pp. 215-227, Sept. 1989
- **NOVAK, J.**, *Human Constructivism: A Unification of Psychological and Epistemological Phenomena in Meaning Making*, A paper presented at the Fourth North American Conference on Personal Construct Psychology, San Antonio, Texas, July 18-21, 1990
- **NOVAK, J.**, *A Theory of Education*, Second Edition, Draft of Chapters 1-4, Cornell University, Ithaca, NY, July 1992
- **NOVAK, J.**, *A View on the Current Status of Ausubel's Assimilation Theory of Learning*, A paper presented at the meeting of the American Educational Research Association, San Francisco, California, April 1992.
- **NOVAK, J. ; GOWIN, D.**, *Learning how to learn*, Cambridge University Press, New York, 1991
- **NOVICK, S.; NUSSBAUM, J.**, *Junior High School pupils' understanding of the particulate nature of matter: An interview study*, Science Education, Vol.62, pp. 273-281, 1978
- **NOVICK, S.; NUSSBAUM, J.**, *Pupils' understanding of the particulate nature of matter: A cross-age study*, Science Education, Vol. 65, Nº 2, pp. 187-196, 1981
- **NUFFIELD ADVANCED PHYSICS (Revised)**, Unit K, *Energy and Entropy*, pp. 247-290, Longman, 1979

- **NUFFIELD ADVANCED PHYSICS**, Unit 9, *Change and Chance*, Longman, 1975
- **NUSSBAUM, J.; NOVAK, J.**, *An assessment of children's concepts of earth utilizing structured interviews*, Science Education, 60, 4, pp. 535-550, 1976
- **OGBORN, J.**, *Dialogues concerning two old sciences*, Physics Education, June 1976
- **OGBORN, J.**, *The second law of thermodynamics: a teaching problem and an opportunity*, School Science Review, vol. 57, N° 201, pp. 654-672, 1976
- **OGBORN, J.**, *Energy and fuel: the meaning of 'the go of things'*, in Energy Matters, Proceedings of an invited conference, University of Leeds, pp. 59-66, March 1985
- **OGBORN, J.**, *Energy and fuel: the meaning of 'the go of things'*, School Science Review, pp. 30-35, 1986
- **OGBORN, J.**, *Energy, change, difference and danger*, School Science Review, Vol. 72, N° 259, Dec. 1990
- **OGBORN, R; GILBERT, G.**, *A technique for exploring students' views of the world*, Physics Education, Vol. 15, pp.376-379, 1980
- **OKUN, L.**, *The concept of mass*, Physics Today, June 1989
- **OREAR, J.**, *Física*, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 1971
- **OSBORNE, R.; FREYLEY, P.**, *Learning in Science, The Implication of Children's Science*, London, Heyneman, 1985
- **OSBORNE, R.; SCHOLLUM, B.**, *Coping in Chemistry*, Australian Science Teachers Journal, 29, 1, pp. 13-24, 1983
- **PANSE, S., RAMADAS, J., KUMAR, A.**, *Alternative conceptions in Galilean relativity: frames of reference*, International Journal of Science Education, Vol. 16, N° 1, pp. 63-82, Jan.-Feb. 1994
- **PARRY, R.**, *New definitions of force and mass*, School Science Review, N° 167, pp. 268-269, Nov. 1967

- **PEDERSEN, O.**, *Early Physics and Astronomy-A Historical Introduction*, Cambridge University Press, Cambridge 1993
- **PEÑA, J.; CALVO, J.; RUBIO, S.; SUERO, M.; PÉREZ, A.**, *Estudio de preconcepciones y errores conceptuales sobre calor y temperatura en diferentes niveles del sistema educativo*, comunicação P-13 do 1.º Encontro Ibérico sobre Enseñanza de la Física, Universidad de Valladolid, Sep. 1991
- **PEREIRA, D.**, *A Aprendizagem dos Conceitos de Energia e Entropia no contexto das Ciências Físicas*, Actas do 1º Encontro Nacional de Didácticas e Metodologias de Ensino, Dep. de Did. e Tecn. Educ., Universidade de Aveiro, 1988
- **PEREIRA, D.**, *A Epistemologia da Química e a Estrutura e Lógica dos seus Discursos*, Química, boletim da Sociedade Portuguesa de Química, 57, pp. 22-31, 1995
- **PERES, A.; ZUREK, W.**, *Is quantum theory universalily valid?*, American Journal of Physics, Vol. 50, Nº 9, pp. 807-810, Sept. 1982
- **PEREZ, A.; SUERO, M.; CALVO, J.; PEÑA, J.; MONTANERO, M.; RUBIO, S.**, *Preconcepciones y errores conceptuales en mecanica*, Comunicação DI 20 do III Encontro Ibérico sobre Enseñanza de la Física, Jaca, Sep. 1993
- **PETERS, P.**, *Even Honors Students Have Conceptual Difficulties with Physics*, American Journal of Physics, Vol. 50, Nº 6, pp. 501-508, June 1982
- **PFUNDT, H.**, *Pré-Instructional conceptions about substances and transformations of substances*, in Proceedings of the international workshop on “Problems Concerning Student’s Representation of Physics and Chemistry Knowledge, Ludwigsburg: Paedagogische Hochschule, pp. 320-341, 1981
- **PIAGET, J.**, *Psicologia e Epistemologia*, Publicações Dom Quixote, Lisboa, 1976
- **PIAGET, J.**, *Seis estudos de psicologia*, Publicações Dom Quixote, Lisboa, 1976
- **PIAGET, J.**, *Problemas de Psicologia Genética*, Publicações Dom Quixote, Lisboa, 1977
- **PIAGET, J.; GARCIA, R.**, *Psicogénese e História das Ciências*, Pub. Dom Quixote, Lisboa, 1987

- **POINCARÉ, H.**, *Ciência e Hipótese*, Galeria Panorama, Lisboa 1970
- **POLITZER, G.**, *Princípios Elementares de Filosofia*, Editora Prelo, Lisboa, 1975
- **PONCE, A.; CAMARA, E.; CRUZ, J.; SCALA, J.**, *El modelo constructivista en la Enseñanza de la Física*, Comunicação DI 44 do III Encuentro Ibérico sobre Enseñanza de la Física, Jaca, Sep. 1993
- **POPPER, K.**, *Conjecturas e Refutações*, Ed. Un. de Brasília, Brasília, 1982
- **POPPER, K.**, *A Lógica da Pesquisa Científica*, Ed. Cultrix, S. Paulo, 1985.
- **POPPER, K.**, *O Realismo e o Objectivo da Ciência-Pós-Escrito à Lógica da Descoberta Científica*, Volume I, Publicações Dom Quixote, Lisboa, 1987
- **POPPER, K.**, *Sociedade Aberta- Universo Aberto*, Publicações Dom Quixote, Lisboa, 1991
- **POPPER, K.**, *A Teoria dos Quanta e o Cisma na Física-Pós-Escrito à Lógica da Descoberta Científica*-Volume III, Publicações Dom Quixote, Lisboa, 1992
- **POPPER, K.**, *O Universo Aberto-Pós-Escrito à Lógica da Descoberta Científica*, Volume II, Publicações Dom Quixote, Lisboa, 1992
- **POPPER, K.**, *A Lógica da Pesquisa Científica*, Editora Cultrix, 9ª edição, São Paulo, 1993
- **POPPER, K.; LORENTZ, K.** *O Futuro Está Aberto*, 2ª Edição, Editorial Fragmentos, Lisboa, 1990
- **PRATT, D.**, *How to Find and Measure Bias in Textbooks* Englewood Cliffs, Educational Technology Publications, N.J., 1972
- **PROJECTO DE FÍSICA**, Unidade 2, *Movimento nos Céus*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1978
- **PROJECTO DE FÍSICA**, Unidade1, *Conceitos de movimento*, *Guia do professor*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1978
- **RADUNSKAIA, I.**, *Dialéctica do conhecimento na física moderna*, Ed.Estampa, Lisboa, 1974

- **RECHERCHE EN DIDACTIQUE DE LA PHYSIQUE: les actes du premier atelier international**, Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 1983
- **REIF, F.**, *Teaching problem-solving: a scientific approach*, The Physics Teacher, 19, 310, 1981
- **REIF, F.**, *Understanding and teaching problem-solving in Physics*, International summer workshop: Research on Physics Education, La Loude les Maures, France, pp. 15-53, July 1983
- **REIF, F.**, *Abordagens científicas do ensino da Ciência*, Physics Today, Nov. 1986
- **REIZINHO, E.**, *Introdução à Pedagogia*, Publicações Europa América, Lisboa 1974
- **RENNER, J. ; ABRAHAM, M. ; GRZYBOWSKI, E. ; MAREK, E.**, *Understandings and Misunderstandings of Eighth Graders of Four Physics Concepts Found in Textbooks*, Journal of Research in Science Teaching, Vol.27, N°.1, pp. 35-54, 1990
- **RESNICK, R.**, *Introdução à Relatividade Especial*, Ed Univers. S. Paulo, 1971
- **RESNICK, R.; HALLIDAY, D.**, *Basic Concepts in Relativity and Early Quantum Theory*, sec. ed., John Wiley & Sons, New York, 1985
- **REYNOSO, H.; FIERRO, H.; TORRES, O.**, *The alternative frameworks presented by Mexican Students and teachers concerning the free fall of bodies*, International Journal of Science Education, Vol. 15, N° 2, pp. 127-138, March-April 1993
- **RIBEIRO, J.**, *Desenvolvimento intelectual*, in Psicologia do Desenvolvimento e da Educação de Jovens, Universidade Aberta, 1990
- **RICHARDS, J.; SEARS, F.; WEHR, M.; ZEMANSKY, M.**, *Modern College Physics*, Addison-Wesley Publishing Company, 1964
- **ROHRLICH, F.**, *An elementary derivation of $E=mc^2$* , American Journal of Physics, 58, 4, April 1990

- **ROLLNICK, M.; RUTHERFORD, M.,** *African primary school teachers- What ideas do they hold on air and air pressure?*, International Journal of Science Education, Vol.12, Nº 1, January-March 1990
- **RON, J. ,** *El origen y desarrollo de la relatividad*, Alianza Universidad, Madrid, 1983
- **RONAN, A.,** *História Ilustrada da Ciência da Universidade de Cambridge*, Volumes I, II, III e IV, Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 1987.
- **ROSMORDUC, J.,** *De Tales a Einstein*, Editorial Caminho, Lisboa, 1983.
- **ROSS, K. A. ,** *There is no energy in food and fuels - but they do have fuel value*, School Science Review, Vol. 75, Nº 271, Dec. 1993
- **ROUSSEAU, P.,** *História da Ciência*, Editorial Aster, Lisboa, s/d
- **ROWELL, J.; DAWSON, C.,** *Laboratory counter-examples and the growth of understanding in science*, European Journal of Science Education, Vol. 5, pp. 203--215, 1983
- **RUBIO, S.; SUERO, M.; MONTANERO, M.; CALVO, J.; PÉREZ, A.; PEÑA, J.,** *Persistencia de algunas preconcepciones erroneas en dinamica*, comunicação P-29 do 1.º Encontro Ibérico sobre Enseñanza de la Física, Universidad de Valladolid, Sep. 1991
- **RUBIO, S.; CALVO, J.; SUERO, M.; PEREZ, A., PEÑA, J.; MONTANERO, M.,** *Evolucion de los conceptos en torno a calor y temperatura en los diferentes niveles del sistema educativo mediante mapas conceptuales*, Comunicação IXP 36 do 2º Encontro Ibérico para o Ensino de Física, UTAD, Vila Real, Set. 1992
- **RUPÉRES, F.,** *Investigaciones y Experiencias- Los Mapas Conceptuales y la Enseñanza/Aprendizaje de la Física*, Revista de Educacion, Nº 295, pp. 381-409, 1991
- **RUSSEL, T. ; MUNBY, H.,** *Science as a Discipline, Science as Seen by Students and Teachers' Professional Knowledge*, in *Doing Science: Images of Science in Science Education*, ed. Robin Millar, The Falmer Press, pp. 107-125, London, 1989

- **RUSSEL, T.**, *Analysing arguments in science classroom discourse: Can teachers' questions distort scientific authority?*, Journal of Research in Science Teaching, 20, pp. 27-45, 1983
- **RUSSELL, B.**, *Os Problemas da Filosofia*, 5ª Ed., Arménio Amado Editor, Coimbra, 1980
- **SADANAND, N.; KESS, J.**, *Concepts in Force and Motion*, The Physics Teacher, pp. 530-533, Nov. 1990
- **SAGAN, C.**, *Cosmos*, Ed. Gradiva, Lisboa, 1984
- **SALAM, A.**, *Unification of Fundamental Forces*, The first of the 1988 Dirac memorial lectures, Cambridge University Press, Cambridge, 1990
- **SALTIEL, E.; MALGRANGE, J.**, *Spontaneous ways of reasoning in elementary Kinematics*, European Journal of Physics, vol.2, pp.73-80, 1980
- **SANTOS, J.**, *Galileu Galilei Diálogo dos Grandes Sistemas* (primeira Jornada), Publicações Gradiva, Lisboa, 1979
- **SANTOS, M.**, *Mudança Conceptual na Sala de Aula. Um desafio pedagógico*, Lisboa, Livros Horizonte, 1991
- **SARASON, S.**, *Aspects of the History of Psychology in America, 1892-1992*, New York, 1995
- **SCHRÖDINGER, E.**, *Vida, Espírito e Matéria*, Publicações Europa América, Lisboa, 1963
- **SCHURMANN, P.**, *História de la Física*, 1º e 2º Volumes, Editorial Nova, Buenos Aires, 1946
- **SCHWAB, J.**, *Problems, Topics, and Issues*, In S.Elam, Education and the Structure of Knowledge. Chicago, IL: Rand, McNally, 1964
- **SCIARRETTA, M.; STILLI, R.; MISSONI, M.**, *On the thermal properties of materials - common-sense knowledge of italian students and teachers*, International Journal of Science Education, Vol. 12, Nº 4, pp. 369-379, 1990
- **SEARS, F.; ZEMANSKY, M.**, *Física*, Ao Livro Técnico, Rio de Janeiro, 1963

- **SEBASTIÀ, J.**, *Cognitive constraints and spontaneous interpretations in Physics*, International Journal of Science Education, vol. 11, Nº 4, 1989
- **SELLERI, F.**, *O que é a energia*, Editorial Notícias, Lisboa, s/d
- **SELLERI, F.**, *Paradoxos e Realidade-Ensaio sobre os fundamentos da microfísica*, Editorial Fragmentos, Lisboa, 1990
- **SEQUEIRA, M.; LEITE, L.**, *Alternative Conception and History of Science*, Physics Teacher Education, Science Education, Vol 75, Nº1, pp. 45 a 46, 1991
- **SEXL, R.**, *Some Observations Concerning the Teaching of the Energy Concept*, European Journal of Science Education, Vol.3, No. 3, pp. 285-289, 1981
- **SHAVELSON, R.**, *Review of research on teachers' pedagogical judgements, plans and decisions*, Elementary School Journal, 83, 4, pp. 392-413, 1983
- **SHIMONY, A.**, *The Reality of the Quantum World*, Scientific American, pp.36-43, Jan. 1988
- **SILVA, J.; LOCHAK, G.**, *Quanta Grãos e Campos*, Instituto de Novas Profissões, Coleção Estudo Geral, 1988
- **SILVA, J.; MACHADO, A.**, *Lições Elementares de Física Experimental*, II vol., Livraria Cruz, Braga, s/d
- **SILVESTRINI, V.**, *Introdução à teoria da relatividade*, Ed. Notícias, Lisboa, s/d
- **SIMMONS, D.**, *New definitions of force and mass*, School Science Review, Nº167, pp. 269-270, 1967.
- **SJOBORG, S.; LIE, S.**, *Ideas about force and movement among Norwegian pupils and students*, University of Oslo, Centre for School Science, 1981
- **SMITHS, A.**, *A Revolução Científica nos séculos XVI e XVII*, Editorial Verbo, Lisboa, 1973
- **SOLOMON, J.**, *How Children Learn about energy or Does the first law come first?*, School Science Review, Vol. 63, Nº 224, pp. 415-22, March 1982
- **SOLOMON, J.**, *Learning about energy: how pupils think in two domains*, European Journal of Science Education, Vol 5, Nº1, pp. 56-59, 1983

- **SOLOMON, J.**, *Energy for the citizen*, in Energy Matters, Proceedings of an invited conference, pp. 25-31, March 1985
- **SOLOMON, J.**, *Social Influences on the Construction of Pupils' understanding of science*, Studies in Science Education, 14, pp. 63-82, 1987
- **SOUSA, J.**, *Forças nos eixos de rotação*, Gazeta de Física, Vol.8, Fasc.2, pp.54-56, 1985
- **SPURGIN, C.**, *Charles's Law - The truth*, School Science Review, Vol. 71, Nº 254, pp. 47-59, Sep.1989
- **STABLES, G.**, *Weight, 'g' and weightlessness*, School Science Review, Nº188, pp. 602-603, 1973
- **STACHEL, J. ; TORRETTI R.**, *Einstein's first derivation of mass-energy equivalence*, American Journal of Physics, 50, 8, Aug. 1982
- **STAVI, R.**, *Pupils' problems in understanding conservation of matter*, International Journal of Science Education, Vol. 12, Nº5, 1990
- **STEAD, B.**, *Energy, Learning in Science Project*, University of Waikato, New Zealand, 1980
- **STEINBERG, M.**, *The Origins of Force - Misconceptions and Classroom Controversy*, Paper presented at the Summer Meeting of the American Association of Physics teachers, Columbus, June 1986
- **STEINBERG, M.; BROWN, D.; CLEMENT, J.**, *Genius is Not Immune to Persistent Misconceptions: Conceptual Difficulties Impeding Isaac Newton and Contemporary Physics Students*, International Journal of Science Education, Vol. 12, Nº 3, pp. 265-273, 1990
- **STRAWBRIDGE, D.**, *Weight: a Sassenach's view*, School Science Review, Nº187, Dec. 1972
- **SUMMERS, M.**, *Philosophy of Science in the science teacher education curriculum*, European Journal of Science Education, 41, 1, pp. 19-27, 1982
- **SUMMERS, M.**, *Teaching Heat- an Analysis of Misconceptions*, School Science Review, 229, pp. 670-676, June 1983

- **SUMMERS, M.**, *Learning conceptual science-helping the primary school teacher*, The British Psychological Society Education Section Review, Vol. 14, Nº 1, pp. 26--30, 1990
- **SUMMERS, M.**, *Improving primary school teachers' understanding of science concepts-theory into practice*, International Journal of Science Education, Vol.16, Nº 1, pp. 25-40, January-March 1992
- **SUMMERS, M.; GILBERT, J.**, *A model for constructivist initial teacher education*, International Journal of Science Education, Vol. 11, Nº 1, pp. 35 a 37, 1989
- **TABER, K.**, *Energy by many other names*, School Science Review, Vol. 70, Nº 252, pp. 58-61, March 1989
- **TAYLOR, E.; WHEELER, J.**, *Spacetime Physics*, Institution Press, Washington, 1975
- **TAYLOR, E.; WHEELER, J.**, *Spacetime Physics*, Institution Press, Washington, 1992
- **TERRY, C.**, *Weight-one kind of force*, School Science Review, Nº 192, pp. 609-610, March 1974
- **TERRY,C.; JONES, G.**, *Alternative frameworks: Newton's third law and conceptual change*, European Journal of Science Education, Vol. 8, Nº 3, pp. 291-298, 1986
- **TEXTOS FUNDAMENTAIS DA FÍSICA MODERNA, I volume- O Princípio da Relatividade**, Fund. Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1972
- **THE PRINCIPLE OF RELATIVITY**, *a collection of original papers on the special and general theory of relativity* , Dover Publications, New York, s/d
- **THOM, R.; ABRAGAM, A.; JACOB, P.; et al**, *A Filosofia das Ciências Hoje*, Editorial Fragmentos , Lisboa 1988
- **THOMAZ, M.**, *An analysis of student's understanding about the concept of force*, Universidade de Aveiro, 1983

- **THOMAZ, M.** , *Uma perspectiva construtivista para o ensino da Física-I- "Psicologia da construção pessoal" de George Kelly* , Gazeta de Física, Vol.10, Nº4, pp. 121-128, 1987
- **THOMAZ, M.** , *Uma perspectiva construtivista para o ensino da Física-II- Objectivos para o Ensino da Física*, Gazeta de Física, Vol.11, Nº1, pp. 19-27, 1988
- **THOMAZ, M.; GILBERT, J.**, *A model for constructivist initial physics teacher education*, International Journal of Science Education, vol. 11, Nº 1, 1989
- **THOMAZ, M.; VASCONCELOS, N.**, *A introdução à mecânica no ensino secundário*, Gazeta de Física, Vol.12, Nº1, pp. 16-26, 1989
- **TIBERGHEN, A.**, *Revue Critique sur les recherches visant a elucidar le sens des notions de temperature et chaleur pour les eleves de 10 a 16 ans*, Atelier international d'été: Recherche en didactique de la Physique, La Londe les Maures, France, pp. 55-74, Juin-Juillet 1983
- **TOBIN, K.; ESPINET, M., BYRD, S.; ADAMS, D.**, *Alternative perspectives of effective science Teaching*, Science Education, Vol. 72, nº 4, pp. 433-451, 1988
- **TOBIN, K.; ESPINET, M.**, *Impediments to change: applications of coaching in high school science teaching*, Journal of Research in Science Teaching, Vol. 26, Nº2, pp. 105-120, 1989
- **TOULMIN, S.**, *Human Understanding, Volume 1: The collective Use and Evolution of Concepts*, Princeton University Press, 1972
- **TREAGUST, D.**, *Development and use of diagnostic tests to evaluate students' misconceptions in science*, International Journal of Science Education, Vol. 10, Nº 2, 1988
- **TROWBRIDGE, D.; McDERMOTT, L.**, *Investigation of student understanding of the concept of velocity in one dimension*, American Journal of Physics, Vol. 48, Nº 12, pp. 1020-1028, Dec. 1980

- **TROWBRIDGE, D.; McDERMOTT, L.,** *Investigation of student understanding of the concept of acceleration in one dimension*, American Journal of Physics, Vol.49, Nº3, pp.242-253, March 1981.
- **TRUMBULL, D.; SLACK, M.,** *Learning to ask, listen, and analyse: using structured interviewing assignments to develop reflection in preservice science teachers*, International Journal of Science Education, Vol. 13, Nº 2, April-June 1991
- **TRUMPER, R.,** *Being constructive: an alternative approach to the teaching of the energy concept - part one*, International Journal of Science Education, Vol. 12, Nº 4, July-Sept. 1990
- **TRUMPER, R.,** *Children's energy concepts: a cross age study*, International Journal of Science Education, Vo. 15, Nº 2, pp. 139-148, 1993
- **TUCKMAN, B.,** *Conducting Educational Research*, New York, Ed. Harcourt Brace Jovanovich, 1978
- **TWIGGER, D.; BYARD, M.; DRIVER, R.; DROPER, S.; HARTLEY, R.; HENNESSI, S.; MOHAMED, R.; O'MALLEI, C.; SHEA, T.; SCANLON, E.,** *The conception of force and motion of students aged between 10 and 15 years: an interview study designed to guide instruction*, International Journal of Science Education, vol. 16, Nº 2, pp. 215-229, 1994
- **VALADARES, J. ; PEREIRA, D.,** *Didáctica da Física e da Química*, Lisboa, Universidade Aberta, Vol.1, pp. 48-54, Lisboa, 1991
- **VALADARES, J. ; SILVA, L.,** *Considerações a propósito da dedução da fórmula do potencial eléctrico de um condutor esférico*, Resumos da 4ª Conferência Nacional de Física, Évora, p. 819, 1984
- **VALADARES, J.,** *As Concepções Empíricas e o Ensino da Física*, Comunicação IXP 10 do 2º Encontro Ibérico para o Ensino de Física, UTAD, Vila Real, Set. 1992

- **VALADARES, J.**, *Spontaneous thinking of Secondary teachers about the relativity of mechanic magnitudes*, in Proceedings of the third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics, Ithaca, N.Y., Cornell University, 1993
- **VALADARES, J.**, *Concepções Epistemológicas sobre o conhecimento físico*, Comunicação B2-19 do 5º Encontro Ibérico para la Enseñanza de la Física, Universidade de Santiago de Compostela, Sep. 1995
- **VALENTE, M.; PEREIRA, D.**, *Algumas considerações sobre a didáctica do conceito de energia*, Gazeta de Física, Vol. 13, Fasc. 4, Outubro, 1990
- **VANCOURT, R.**, *Kant*, Biblioteca Básica da Filosofia, Edições 70, Lisboa, 1991
- **VAN FRAASSEN, B.**, *The Scientific Image*, Oxford University Press, Oxford, 1980
- **VARELA, F.**, *Conhecer as ciências cognitivas- tendências e perespectivas*, Instituto Piaget, Lisboa, 1992
- **VASCONCELOS, N. ; LOUREIRO, M.J.**, *Conceitos Alternativos em Física: Sua Importância na Formação de Professores*, Actas do 1º Encontro Nacional de Didácticas e Metodologias de Ensino, Dep. de Did. e Tecn. Educ. , Universidade de Aveiro, Fev. 1988
- **VASCONCELOS, N.**, *Estudo de noções dos alunos sobre a existência (ou não existência) de forças em dadas direcções: sua evolução com o nível etário e formação científica em Física dos alunos*, Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica, Universidade de Aveiro, 1985
- **VÉDRINE, H.**, *As Filosofias do Renascimento*, Publicações Europa-América, Lisboa, 1974
- **VERGEZ, A.**, *David Hume*, Biblioteca Básica da Filosofia, Edições 70, Lisboa, 1984
- **VIENNOT, L.**, *Spontaneous Ways of reasoning in elementary dynamics*, European Journal of Science Education, Vol.1, Nº 2, pp. 205-221, 1979

- **VIENNOT, L.**, *Études sur les raisonnements des étudiants: quelles implications pour l'enseignement?*, XXIII Reunion Bienal de la Real Sociedad española de Física, 1993
- **VIGLIETTA, L.**, *'Efficiency' in the teaching of energy*, Physics Education, Vol. 25, 1990
- **VIGLIETTA, L.**, *A more "efficient" approach to energy teaching*, International Journal of Science Education, Vol. 12, Nº 5, Oct.-Dec. 1990
- **VILLANI, A.**, *Ideias espontâneas e ensino da Física*, Revista de Ensino da Física, vol. 11, pp. 130-147, 1989
- **VILLANI, A.; PACCA, J.**, *Students' spontaneous ideas about the speed of light*, International Journal of Science education, Vol.9, Nº1, pp.55-66, 1987
- **VILLANI, A.; PACCA, J.**, *Spontaneous reasoning of graduate students*, International Journal of Science Education, Vol. 12, Nº 5, pp. 589-600, Oct.-Dec. 1990
- **VOLTAIRE.**, *Cartas Filosóficas*, Editorial Fragmentos, Lisboa 1992
- **VON GLASERSFELD, E.**, *An introduction to radical constructivism*, In: P. Watzlanick(ed.), *The Invented Reality*, New York: Norton, pp. 17-40, 1984
- **VYGOTSKY, L.**, *Aprendizagem e desenvolvimento intelectual na idade escolar*, In: *Psicologia e Pedagogia*, Biblioteca de ciências pedagógicas, Editorial Estampa, Lisboa, 1977
- **WARREN, J.**, *Circular motion*, Physics Education, Vol. 6, pp. 74-77, 1971
- **WARREN, J.**, *The teaching of the concept of heat*, Physics Education, Volume 7, Nº 1, Jan. 1972
- **WARREN, J.**, *The mystery of mass-energy*, Physics Education, 11, pp. 52-54, 1976
- **WARREN, J.**, *The nature of energy*, European Journal of Science Education, Vol. 4, pp. 295-297, 1982
- **WARREN, J.**, *Teaching about energy*, Physics Education, 18, 1983

- **WATTS, D.M.; ZYLBERSZTAJN, A.,** *A Survey of Some Children's Ideas about Force*, Physics Education, Vol. 16, Nº 6, pp. 360-65, Nov.1981
- **WATTS, M; GILBERT, J.,** *Enigmas in school science: students' conceptions for scientifically associated words*, Research in Science and Technological Education, Vol.1, nº2, pp. 161-171, 1983
- **WATTS, M; GILBERT, J.,** *The new learning: Research, development and the reform of school science education*, Studies in Science Education, 16, 1989
- **WATTS, D.,** *Some alternative views of energy*, Physics Education, Vol. 18, Nº 5, pp. 213-217, 1983
- **WATTS, D.,** *A study of schoolchildren's alternative frameworks of the concept of force*, European Journal of Science Education, 5, pp. 217-230, 1983
- **WEBB, P.,** *Primary science teachers' understandings of electric current*, International Journal of Science Education, Vol. 14, Nº 4, pp. 423-429, Oct.-Dec. 1992
- **WEISSKOPF, V.,** *A Revolução dos Quanta*, Terramar, Lisboa, 1989
- **WEISSKOPF, V.,** *La Física en el siglo XX*, Alianza Editorial, Madrid, 1990
- **WESTFALL, R.,** *The Construction of Modern Science - Mechanisms and Mechanics*, Press Syndicate of the University of Cambridge, 1989
- **WESTFALL, R.,** *Never at Rest-A Biography of Isaac Newton*, Cambridge University Press, 1988
- **WHITAKER, M.,** *Kuhn's Paradigm and Example-based Teaching of Newtonian Mechanics*, European Journal of Science Education, Vol. 2, Nº 2, pp. 145-153, 1980
- **WHITAKER, R.,** *Aristotle is not dead: student understanding of trajectory motion*, American Journal of Physics, Vol. 51, Nº352, 1983
- **WHITE, B.,** *Sources of difficulty in understanding newtonian dynamics*, Cognitive Science, pp. 41-65, 1983
- **WILLIAMSON, D.,** *Mass and Weigh*, School Science Review, Nº190, pp. 603-605, 1973

- **WOOLNOUGH, B.**, *Physics Teaching in Schools 1960-85 of People, Policy and Power*, The Falmer Press, 1988
- **YAVORSKY, B.; PINSKY, A.**, *Fundamentals of Physics*, Vol.I, Mir Publishers Moscow, 1975
- **ZEMANSKY, M.**, *The Use and Misuse of the Word "Heat" in Physics Teaching*, The Physics Teacher, Sept. 1970
- **ZIMAN, J.**, *Reliable Knowledge*, Cambridge University Press, London, 1978
- **ZOLLER, U.; DONN, S.; WILD, R.; BECKETT, P.**, *Students' versus their teachers' beliefs and positions on Science/Technology/society-oriented studies*, International Journal of Science Education, Vol.13, No. 1, Jan.-March 1991

FIM

DO

VOLUME II

APÊNDICES

APÊNDICE I

PENSAMENTO ESPONTÂNEO DE PROFESSORES DE FÍSICA DO ENSINO SECUNDÁRIO ACERCA DA RELATIVIDADE DAS GRANDEZAS MECÂNICAS

PENSAMENTO ESPONTÂNEO DE PROFESSORES DO ENSINO SECUNDÁRIO ACERCA DA RELATIVIDADE DE GRANDEZAS MECÂNICAS

JORGE VALADARES

Universidade Aberta, Lisboa

INTRODUÇÃO

Raciocinamos com conceitos através de complexas relações entre eles. Quando, em consequência das experiências por nós vividas dentro e fora da escola, a rede de relações conceptuais que se estabelece no nosso cérebro nos conduz a raciocínios inaceitáveis do ponto de vista científico, esses raciocínios inaceitáveis persistem muito mais do que as nossas expectativas fariam supor.

A história da Ciência é rica em relações conceptuais incorrectas que duraram milhares de anos (veja-se, por exemplo, a relação peso-velocidade ou a relação micróbio-geração espontânea). Por outro lado, as pesquisas levadas a cabo na sala de aula têm revelado uma persistência enorme de pensamentos espontâneos dos alunos que se afastam mais ou menos daqueles que a ciência aceita. Esses pensamentos espontâneos têm raízes empíricas, alicerçando-se nas experiências vividas ao longo da vida, mas também têm raízes históricas. Assim, por exemplo, a ideia de que um corpo só mantém a sua velocidade se nele actuar uma «força movente» assenta claramente em experiências como a do voo dos projecteis, o arrastamento dos corpos, a colisão dos objectos, etc., as quais conduzem a que, na estrutura cognitiva, se estabeleçam ligações incorrectas entre os conceitos relacionados com o movimento. Mas uma tal ideia também tem uma longa história, tendo-se enraizado na mente humana e propagado ao longo dos séculos com base na linguagem. De, facto, muitos foram os pensadores que acreditaram na existência de uma causa do movimento interior aos corpos. Assim, por exemplo, o *ímpeto* de João Buridan era considerado uma «certa potência» comunicada aos corpos no acto de os forçar a moverem-

se: enquanto o ímpeto de um corpo se mantinha, mantinha-se o movimento, porque permanecia a causa; quando se esgotava o ímpeto, os corpos adquiriam imediatamente o seu movimento natural aristotélico. Mais tarde, a quantidade de movimento de Descartes e a força viva de Leibniz também foram consideradas grandezas que, quando comunicadas por corpos em movimento a outros corpos em repouso, eram as causas interiores que explicavam que estes se movessem.

Sabe-se hoje que existem determinadas estruturas universais no pensamento da grande maioria dos estudantes de Física acerca das mais diversas situações físicas. Muitas das representações dos estudantes revelam semelhanças com as que foram surgindo ao longo da história da ciência. No que se refere às representações em cinemática, Saltiel e Malgrange (1980, p. 73) apontaram algumas características da *cinemática espontânea* que é usada pelos alunos como referencial alternativo:

- 1ª – a velocidade de um móvel, a distância que ele percorre e a trajectória que descreve são tidas como independentes do referencial;
- 2ª – o movimento é explicado em termos causais por meio da associação de um «motor» que possui a velocidade real observável para o objecto móvel;
- 3ª – o movimento é explicado em termos descritivos relacionando-o a um espaço absoluto; neste esquema há apenas uma velocidade verdadeira, e um espaço percorrido verdadeiro, e qualquer diferença nas medições obtidas por vários observadores móveis entre si é provocada por um movimento «aparente», entendido como uma ilusão óptica;
- 4ª – nas situações com movimentos «de transporte», é usada a ideia de adição de movimentos

absolutos, em vez da que envolve a transformação do movimento relativo; as velocidades e as distâncias reais são encaradas como somas de velocidades e distâncias «próprias» percorridas pelo objecto móvel e o seu «motor».

No Brasil, os investigadores Alberto Villani e Jesuina Pacca efectuaram uma pesquisa com estudantes graduados em Física envolvidos em cursos de pós-graduação, e detectaram que neles persistem concepções espontâneas idênticas às manifestadas pelos estudantes do ensino secundário, as quais apresentam as características sintetizadas por Saltiel e Malgrange. Não será que essas mesmas concepções alternativas também serão espontaneamente utilizadas por professores com maior ou menor experiência de ensino ao analisarem situações físicas pouco familiares? Foi para responder a esta questão que efectuámos esta pesquisa.

METODOLOGIA E POPULAÇÃO-ALVO DA PESQUISA

No ano lectivo de 1992-93 orientámos duas acções de formação sobre relatividade restrita destinadas a professores de Física e Química. O programa das acções foi o seguinte:

1. a crise do éter luminífero na Física clássica e a teoria da relatividade restrita como única saída possível. (3 horas)
2. Algumas noções fundamentais de cinemática relativista. (3 horas)
3. A dinâmica relativista e as noções de massa e energia. (3 horas)
4. Concepções alternativas em relatividade. (3 horas)

Os **objectos** sobre os quais incidiu a nossa análise foram as respostas dos professores participantes nas acções a 8 questões envolvendo 3 situações físicas, questões essas que faziam parte de um instrumento de pesquisa que apresentamos em apêndice.

As questões referentes às duas primeiras situações são da autoria dos professores brasileiros A. Villani e J. Pacca. A pergunta envolvendo a terceira situação foi acrescentada com o mesmo objectivo das duas primeiras, e que é o de encontrar resposta à seguinte **questão-foco**:

Em que medida os professores portugueses apresentam o mesmo tipo de raciocínio espontâneo revelado pelos estudantes graduados brasileiros?

As respostas foram cuidadosamente analisadas de modo a tentar descobrir a presença das seguintes características:

– típicas dos raciocínios baseados na *relatividade einsteiniana*:

- uma escolha, em cada caso, de um referencial inercial conveniente e sem qualquer indício de privilégio concedido aos referenciais terrestres ou a quaisquer outros assumidos como referenciais absolutos;
- a constância da velocidade da luz em todas as direcções e em todos os referenciais e um assumir do seu carácter finito;
- a relatividade das restantes velocidades;
- a relatividade dos intervalos de tempo, com um aumento dos mesmos quando respeitantes a fenómenos observados em movimento;
- a relatividade das distâncias espaciais, com uma diminuição das mesmas quando observadas em movimento;
- a relatividade das distâncias percorridas e, portanto, das trajectórias, decorrentes da relatividade das velocidades e/ou dos tempos de percurso;
- uma utilização apropriada das fórmulas de transformação de Lorentz quando tal se torne necessário;

– típicas dos raciocínios baseados na *relatividade galileana*:

- uma escolha, em cada caso, de um referencial inercial conveniente e sem qualquer indício de privilégio concedido aos referenciais terrestres, mas assumindo a existência de um referencial absoluto em que a luz tem a mesma velocidade em todas as direcções;
- a constância da velocidade da luz em todas as direcções no referencial absoluto e um não assumir do seu carácter finito;
- a relatividade de todas as velocidades nos referenciais móveis;
- a não relatividade dos intervalos de tempo;
- a não relatividade das distâncias espaciais;
- a relatividade das distâncias percorridas e, portanto, das trajectórias, decorrentes da relatividade das velocidades mas não dos tempos de percurso;
- uma utilização apropriada das fórmulas de transformação de Galileu quando tal se torne necessário;

– **típicas dos raciocínios baseados numa «cinemática espontânea»:**

- a não escolha de referencial com uma mais ou menos tácita adopção sistemática dos referenciais terrestres, ou de um referencial espacial considerado absoluto, como base do raciocínio, e onde se situa um observador privilegiado com acesso aos valores «reais», «próprios», «autênticos» ou «verdadeiros»;
- um não assumir do carácter finito da velocidade da luz;
- o adoptar de uma velocidade como privilegiada, a «autêntica» ou «verdadeira», aquela que se refere ao espaço absoluto tacitamente adoptado;
- a não relatividade dos intervalos de tempo;
- a não relatividade das distâncias espaciais;
- a não relatividade das distâncias percorridas e, portanto, das trajectórias, antes privilegiando uma distância percorrida como «autêntica» ou «verdadeira» (no caso de se tornarem evidentes outras, estas são consideradas como o resultado de movimentos aparentes);
- uma utilização inapropriada de fórmulas de transformação em que se torna patente um nítido privilégio concedido aos referenciais terrestres.

Estivemos, pois, atentos a tudo o que fossem indícios ou testemunhos claros da presença destas características.

A **população** de professores que responderam às questões pode ser caracterizada assim:

– *Experiência* de ensino muito variada:

ALMADA: 23 PROFESSORES; LISBOA: 30 PROFESSORES

	1-5 anos	5-10 anos	10-15 anos	15-20 anos	20-30 anos	30-40 anos
1 nível						
2 níveis	1	1		1	1	
3 níveis	2		1	1		
4 níveis		2	2 3	1 7	1	
5 níveis		2 4	3 1	6 2	2 7	2

– *Formação académica* também muito variada:

ALMADA: 23 PROFESSORES; LISBOA: 30 PROFESSORES

Físico-Químicas	Física	Química	Eng. Química	Farmácia
1 + 11	4 + 1	6 + 12	11 + 6	1 + 0

Começámos por efectuar análises separadas por áreas geográficas, por formações académicas de professores e por grupos de anos de experiência, construindo tabelas de resultados parcelares, *em percentagens*, tais como esta:

LISBOA: 30 PROFESSORES

	SR	GR	SpK	¹¹ FQ	¹ F	¹² Q	⁶ EQ	⁰ Fa	N
$\Delta t_f > \Delta t_b$	A	NR	NR	46	100	17	50	–	11
$\Delta t_f = \Delta t_b$	R	NR	NR	18	0	0	0	–	2
$\Delta t_f < \Delta t_b$	R	R	NR	36	0	67	33	–	14

Δt_f – tempo da antena ao espelho

Δt_b – tempo do espelho à antena

A – em concordância com

R – refutada por

NR – não refutada por

SR – relatividade especial

GR – relat. galileana

SpK – cinemát. espontânea

OS RESULTADOS DA PESQUISA

A primeira conclusão retirada da análise feita é que *as variáveis área geográfica, formação académica e experiência de ensino não influenciaram de modo significativo os tipos de respostas e os respectivos resultados, quer qualitativa quer quantitativamente* (registaram-se algumas flutuações dos resultados, mas sem se notarem diferenças significativas em relação a qualquer das variáveis).

A análise vai ser, pois, apresentada globalmente, ainda que nos quadros se discriminem os resultados obtidos nas duas áreas geográficas. Os quadros apresentam alguns dados obtidos por Villani e Pacca no Brasil para fácil comparação.

1 – PRIMEIRA SITUAÇÃO FÍSICA

Dois sinais luminosos, B e D , e dois veículos espaciais, T_B e T_D partem simultaneamente de um mesmo ponto. Tanto os sinais como os veículos ($v=c/2$) viajam em sentidos opostos.

Questão 1 – Comparação das distâncias percorridas

ALMADA: 23 PROFESSORES;

LISBOA: 30 PROFESSORES; BRASIL: 24 ESTUDANTES

	SR	GR	SpK	N _A	N _L	N _P	N _B
AB=AD	A	A	A	19	24	43	24
$T_B A = T_D A$	A	A	A	16	26	42	24

Apesar de apenas estar envolvido um referencial, apareceram algumas respostas onde foi aplicada a composição galileana de velocidades, com conclusões tais como a de que *a velocidade do sinal B, em relação a T_B , é $c/2$* , ou que *a velocidade de D em relação a B é $2c$* . Por exemplo:

- “ $d_B=L$; $d_D=2L$; $d_{SD}=3L$ ”
- “ T_B move-se $L/2$ e T_D move-se L ”.
- “ $T_DA = L+L/2$ ”.

Também foi usada a composição relativista de velocidades. Por exemplo:

“... e as distâncias são dadas por $(L + c/2 t') / \sqrt{1-1/4}$ e $(L - c/2 t') / \sqrt{1-1/4}$ ”.

Há uma resposta com as distâncias iguais mas mal calculadas:

$$“d=c^2/2L”$$

Outra resposta foi abandonada a meio do raciocínio; mas pode-se concluir que, se fosse completada, originaria uma distância percorrida por T_D maior que L .

Vemos assim que, apesar da trivialidade da questão, apareceram algumas respostas que envolvem velocidades dos veículos superiores à da luz. Comparando estes resultados com os obtidos com os estudantes brasileiros, concluímos que a experiência de ensino teve um efeito negativo. Os professores, revelaram maior tendência para usar raciocínios formais incorrectos, em prejuízo de um raciocínio intuitivo eficaz.

Vale a pena (como fizeram Villani e Pacca) enfatizar os casos em que foi indicado explicitamente o referencial onde a situação está a ser analisada, porque tal facto é um bom indicador (ainda que não absolutamente seguro) de um raciocínio relativista. Estes casos foram menos de 1/5 do total de respostas.

Mas a adopção do referencial pode ter sido feita de modo implícito...

INDICAÇÕES DO REFERENCIAL

	N _A	N _L	N _P	N _B
Indicam o referencial	4	6	10	3
Não indicam o referencial	19	24	43	21

Questão 2 – Distâncias percorridas pelos fogões relativamente a T_B

Esta questão já exige uma mudança para o referencial T_B . À semelhança do que sucedeu com as respostas dadas pelos estudantes brasileiros, as respostas dos professores portugueses foram na sua quase totalidade incompatíveis com a relatividade einsteiniana. Dos 53 professores, 48 responderam que o sinal B está mais perto, o que só por si traduz um raciocínio que tanto pode estar coerente com a relatividade galileana, como também pode estar de acordo com a cinemática espontânea (SpK).

ALMADA: 23 PROFESSORES;
LISBOA: 30 PROFESSORES; BRASIL: 24 ESTUDANTES

	SR	GR	S _p K	N _A	N _L	N _P	N _B
$T_BB < T_BD$	R	A	A	19	29	48	20
$T_BB = T_BD$	A	R	R	4	0	4	4
$T_BB > T_BD$	R	R	R	0	0	0	0

As justificações apresentadas, na sua grande maioria, relativizam a velocidade da luz, considerando implicitamente que o referencial terrestre é um referencial absoluto privilegiado. Quase todas as respostas são muito semelhantes a esta:

«O sinal B está mais perto, porque o sentido do seu movimento é o mesmo do veículo T_B onde viajo.»

Numa resposta é apresentado um esquema de trajectórias, em que a conclusão é que «o sinal B dista $L/2$ de T_B ».

Em que medida, por trás dessas respostas erradas está a tal «cinemática espontânea» a que Saltiel, Malgrange, Villani e Pacca se referem?

Esta segunda questão do teste, assim como a seguinte, não permitem, em nossa opinião, qualquer resposta definitiva a estas perguntas. Afinal a questão é muito semelhante a questões simples do tipo «perseguição de carros» que os professores resolvem nas suas aulas, o que deve ter arrastado muitos professores para a aplicação da relatividade galileana.

Mas é um facto que muito poucas respostas revelam claramente um raciocínio galileano. A maioria das justificações apresentam a ideia de que o veículo persegue a luz, o que poderá traduzir efectivamente um pensamento espontâneo já manifestado por muitos estudantes que consiste na composição de distâncias percorridas consideradas absolutas.

Apesar da simplicidade da questão, transparecem muitos raciocínios que mostram claramente a dificuldade que os professores têm em fazer a transferência para o quadro conceptual da relatividade restrita, devido à dificuldade em se libertarem do «ferrete» do privilégio do referencial Terra. Veja-se, como exemplo, a seguinte resposta:

«A distância de T_B diminui, mas T_B move-se com dilatação do tempo».

De facto T_B move-se em relação à Terra, mas não em relação ao observador que está em T_B .

Há uma clara contaminação de referenciais com privilégio concedido ao terrestre. Para falar em dilatação do tempo, o professor terá de pensar num observador terrestre, e nos fenómenos que ocorrem no referencial T_B . Ora o observador está em T_B (e não na Terra) e o movimento deste ocorre no referencial Terra (e não em T_B). Esta contaminação de referenciais com deslizamento mais ou menos inconsciente do referencial móvel para o referencial Terra no que respeita à importância, apareceu diversas vezes na resolução das questões e na discussão final com que terminaram as acções.

Questão 3 – Distâncias percorridas pelos fótons relativamente a T_D

As respostas relativamente a esta questão mostraram-se absolutamente coerentes com as que foram dadas à questão anterior:

ALMADA: 23 PROFESSORES;
LISBOA: 30 PROFESSORES; BRASIL: 24 ESTUDANTES

	SR	GR	S _p K	N _A	N _L	N _P	N _B
$T_{DB} > T_{DD}$	R	A	A	19	27	46	20
$T_{DB} = T_{DD}$	A	R	R	4	0	4	4
$T_{DB} < T_{DD}$	R	R	R	0	0	0	0

A análise que fizemos às respostas à questão anterior aplica-se *mutatis mutandis* às respostas a esta questão, o que veio reforçar as ideias lá expressas.

2 – SEGUNDA SITUAÇÃO FÍSICA

Nesta situação há um foguetão que, voando com a velocidade $c/2$ sobre uma estação terrestre,

arrasta consigo uma antena na extremidade traseira, a qual emite um sinal luminoso, que após ser reflectido por um espelho situado na extremidade dianteira, volta à antena.

Questão 4 – Comparação entre os tempos de ida e volta do sinal no referencial foguetão

O resultado obtém-se quer haja ou não ideias correctas acerca dos valores atribuídos às distâncias percorridas, bastando que estas sejam consideradas iguais. A justificação das respostas é que é importante.

ALMADA: 23 PROFESSORES;
LISBOA: 30 PROFESSORES; BRASIL: 24 ESTUDANTES

	SR	GR	S _p K	N _A	N _L	N _P	N _B
$\Delta t_f > \Delta t'_b$	R	NR	NR	1	5	6	7
$\Delta t_f = \Delta t'_b$	A	NR	NR	20	22	42	21
$\Delta t_f < \Delta t'_b$	R	R	NR	1	3	4	2

Analiseemos algumas justificações de respostas onde se considera incorrectamente que o sinal luminoso demora mais tempo para ir da antena A ao espelho M do que no regresso:

«uma vez que no percurso AM ele tem de percorrer a distância ao espelho mais a que o foguetão progrediu.»
«porque a velocidade do sinal luminoso é de $c/2$ e de M a A é de $3c/2$ ».
(em duas respostas idênticas)

Quem apresentou a primeira daquelas justificações, respondeu deste modo à questão seguinte:

«A resposta é a mesma da apresentada na questão anterior, uma vez que c é a velocidade com que sai o sinal luminoso e esta de modo algum pode ser superior».

Estamos perante um raciocínio espontâneo na resposta a estas duas questões.

Por outro lado, a justificação apresentada nas duas respostas idênticas envolveu, uma vez mais, a utilização inadequada da lei de composição de velocidades de Galileu. Ela traduz, portanto, um raciocínio híbrido entre o raciocínio Galileano e o pensamento espontâneo de carácter absoluto.

As respostas mais curiosas são as quatro onde se afirma que o tempo da antena ao espelho é menor do que o do espelho à antena. Eis algumas justificações:

«A antena A move-se no mesmo sentido dos fótons na ida, enquanto que o espelho move-se em sentido oposto aos fótons no regresso».
«É devido ao efeito Doppler».

Como, na realidade, a antena não se move no referencial em questão, estamos perante um raciocínio espontâneo que assenta na ideia do movimento absoluto. Mas um tal raciocínio tem outra característica curiosa, que é a de inconscientemente assentar numa *teoria da emissão*. Estas *teorias de emissão* tiveram a sua história no período em que os cientistas tentaram resolver o problema do resultado negativo da experiência de Michelson-Morley no quadro conceptual da mecânica clássica. Elas acabaram por ser infirmadas como consequência da observação das estrelas duplas e pelas experiências de interferometria efectuadas com luz extra-terrestre.

Segundo estas teorias da emissão, a velocidade da luz é c relativamente à fonte de luz, pelo que acaba por depender da velocidade absoluta desta. Assim sendo, nesta situação física, e admitindo o movimento absoluto da fonte como estes professores espontaneamente estão a admitir, a velocidade da luz para a frente, de A a M , seria $c+v_A$ e a velocidade da luz no regresso de M a A seria $c-v_M$.

Cremos ser este um exemplo interessante que vem reforçar a ideia da existência de uma certa homogeneidade entre o raciocínio espontâneo que professores e alunos de Física desenvolvem, e os raciocínios que alguns cientistas, em determinados períodos da história da ciência, utilizaram.

Questão 5 – Comparação dos tempos de ida e volta do sinal no referencial terrestre

Nesta questão o comprimento do foguetão é observado da estação terrestre contraído pelo factor de Lorentz, mas o aspecto decisivo é o maior trajecto percorrido pelo sinal no tempo de ida ao espelho do que no tempo de regresso. Tem-se, pois $\Delta t_f > \Delta t_b$.

ALMADA: 23 PROFESSORES;
LISBOA: 30 PROFESSORES; BRASIL: 24 ESTUDANTES

	SR	GR	S _p K	N _A	N _L	N _P	N _B
$\Delta t_f > \Delta t_b$	A	NR	NR	11	11	22	16
$\Delta t_f = \Delta t_b$	R	NR	NR	8	2	10	13
$\Delta t_f < \Delta t_b$	R	R	NR	3	14	17	1

Primeiro aspecto a destacar: o elevado número de respostas incoerentes com a relatividade quer galileana quer einsteineana: $\Delta t_f < \Delta t_b$.

Analisemos algumas respostas:

«Mais tempo para ir de M a A porque a distância é a mesma mas a velocidade é menor» (as velocidades $c+c/2$ e $c-c/2$ foram calculadas).

Foi usada uma composição de velocidades baseada na *teoria da emissão*.

«A justificação é semelhante à da questão anterior (isto é, a distância a percorrer pelo sinal é igual de A a M e de M a A e a velocidade de propagação do sinal é a mesma.»

«O mesmo que na questão anterior: o intervalo de tempo é igual pois c é constante e a distância a percorrer também.»

Estas respostas (como outras) contêm em si a ideia de que a distância percorrida pela luz é a distância «absoluta» antena-espelho. Trata-se de respostas que pressupõem um raciocínio espontâneo em que as distâncias percorridas são consideradas absolutas, em claro desrespeito pela própria relatividade galileana.

«Gasta o mesmo tempo, de acordo com a teoria da relatividade (e a resposta a Q_4). Intuitivamente acharia o contrário, ou seja: no trajecto de A a M , segundo a mecânica clássica, o foguetão ao avançar, faria com que o espelho M se afastasse e, portanto, a luz demoraria mais tempo a atingir M . Inversamente, no trajecto de M a A , da volta, é a parte de trás do foguetão que se aproxima do sinal luminoso reflectido e, portanto, demoraria menos tempo na volta.»

Esta última resposta é curiosa e mostra que um professor que se tenha libertado, com o domínio da mecânica clássica, do estigma das distâncias percorridas absolutas, pode acabar por retroceder ao raciocínio espontâneo ao penetrar no mundo da relatividade, com o seu maior formalismo.

Notou-se uma inversão de efeitos relativistas (também já verificada com os estudantes brasileiros):

«Gasta mais tempo a ir de A a M , porque o comprimento do foguetão passa a ser maior que L para mim, que me encontro na estação.»

Neste caso é considerada uma dilatação do espaço do foguetão no referencial terrestre, quando na realidade esse espaço se contrai.

Questão 6 – Comparação dos tempos de ida do sinal no referencial terrestre e no referencial foguetão

Esta situação envolve dois efeitos contrários no que se refere ao observador terrestre: a contracção einsteiniana do comprimento do foguetão faz com que o tempo de percurso seja diminuído; o movimento do espelho, obrigando a luz a ter de percorrer uma distância superior ao comprimento do foguetão, faz com que o tempo de percurso seja aumentado. Como o segundo efeito é mais influente, tem-se Δt (na terra) $>$ $\Delta t'$ (no foguetão).

ALMADA: 23 PROFESSORES;
LISBOA: 30 PROFESSORES; BRASIL: 24 ESTUDANTES

	SR	GR	S _p K	N _L	N _A	N _P	N _B
$\Delta t'_r > \Delta t_e$	A	R	NR	21	19	40	18
$\Delta t'_r = \Delta t_e$	R	A	NR	0	2	2	9
$\Delta t'_r < \Delta t_e$	R	R	NR	7	1	8	3

A tendência para considerar as distâncias percorridas com carácter absoluto está bem patente no facto de se ter verificado um número enorme de respostas que ignoraram completamente o aumento da distância percorrida pela luz devido ao facto de o foguetão se mover (e note-se que esse aumento é perfeitamente previsível na relatividade de Galileu):

«Para alguém na estação. Para quem está neste referencial há a dilatação do tempo.»

«Porque o tempo medido no referencial imóvel (supondo a Terra um referencial imóvel), é sempre maior – dilatação do tempo.»

«Para alguém na estação, porque no foguetão há contracção do tempo.»

«Menos tempo para o observador na Terra porque a distância AM não é a mesma para os dois observadores. O observador da Terra deverá ver a distância mais curta.»

«Gasta mais tempo para aquele que mede uma distância de A a M maior, ou seja para alguém no foguetão.»

O pensamento absolutista está ainda mais explícito em respostas com estas:

«Na estação, porque para alguém no foguetão este move-se no mesmo sentido do sinal.»

«O sinal luminoso gasta igual tempo a percorrer a distância de A a M para os dois observadores porque os sinais luminosos deslocam-se com velocidade c .»

Há um tipo de respostas onde está patente um raciocínio híbrido envolvendo a relatividade galileana e a cinemática espontânea. Uma, por exemplo:

«A velocidade do sinal para alguém no foguetão é c . A velocidade do sinal para alguém na estação é $3/2 c$. Portanto o sinal demora menos tempo para o observador na estação terrestre.»

Alguns professores exprimem mesmo esses tempos nas formas L/c e $2L/3c$ ou em formas equivalentes.

É aplicada a regra galileana da composição das velocidades, mas também a mesma distância percorrida nos dois referenciais (o que é uma característica da cinemática espontânea).

Também surgiram respostas em que se verificou o mesmo tipo de inversão de referenciais que se registara com os estudantes brasileiros:

«Na estação porque o sinal tem de percorrer o espaço L e, para a pessoa no foguetão, o sinal percorre menos espaço.»

Nesta resposta considera-se a contracção do espaço no referencial próprio, quando ela é válida apenas no referencial de laboratório onde o foguetão se move.

Questão 7 – Comparação dos tempos de regresso do sinal no referencial terrestre e no referencial foguetão

A distância percorrida pelo sinal luminoso é agora manifestamente *menor* para o observador da estação terrestre, não só porque para ele há contracção relativista do comprimento do foguetão como, também, porque a antena vai ao encontro do sinal. No entanto, na maioria das respostas consta que o *intervalo de tempo é maior para o observador terrestre*.

ALMADA: 23 PROFESSORES;
LISBOA: 30 PROFESSORES; BRASIL: 24 ESTUDANTES

	SR	GR	S _p K	N _L	N _A	N _P	N _B
$\Delta t'_r > \Delta t_e$	A	R	NR	11	6	17	15
$\Delta t'_r = \Delta t_e$	R	A	NR	0	3	3	8
$\Delta t'_r < \Delta t_e$	R	R	NR	12	14	26	7

E porque se verificou este resultado? Porque, na grande maioria das respostas, foi repetido o mesmo raciocínio espontâneo usado na questão anterior. Assim, por exemplo:

– quem tinha afirmado que o tempo de ida era maior na estação devido à dilatação do tempo, continuou a afirmar que o tempo de volta é maior devido à dilatação do tempo;

– quem tinha dito que o tempo de ida é maior para o observador terrestre porque a distância antena-espelho é maior para esse observador, continuou a dizer que o tempo de volta é maior pela mesma razão;

– etc.

Julgamos ser significativo o facto de muitos professores afirmarem «pela mesma razão» ou «a resposta é idêntica à da questão anterior». Mostram a coerência do seu raciocínio, mesmo quando esse raciocínio derrapa para uma cinemática espontânea, eivada de absolutismo, como sucede aqui em muitos casos.

3 – TERCEIRA SITUAÇÃO FÍSICA

Nesta situação um observador terrestre está situado a meio de duas antenas que emitem dois sinais electromagnéticos. Estes são observados simultaneamente por esse observador que mede a distância Δx entre as antenas. Um outro observador, passando num foguetão por cima do observador terrestre com uma velocidade relativista $v = \beta c$, observa as emissões desfasadas de um intervalo de tempo cujo módulo é $\Delta t'$.

Questão 8 – Distância entre as antenas medida pelo observador do foguetão

Foram dadas a escolher as opções que constam do quadro seguinte e foi pedida a justificação para a escolha feita.

	SR	GR	S _p K	N _A	N _L	N _P
$\Delta x' = \Delta x$	R	A	A	1	1	2
$\Delta x' = \Delta x \sqrt{1 - \beta^2}$	R	R	NR	2	7	9
$\Delta x' = \Delta x \sqrt{1 - \beta^2} - v\Delta t'$	A	R	NR	6	9	15
$\Delta x' = \Delta x \sqrt{1 - \beta^2} + v\Delta t'$	R	R	NR	5	2	7

Algumas observações significativas:

- um elevado número (cerca de 40%) de ausência de respostas;
- três respostas com a opção certa, mas sem qualquer justificação;
- duas respostas onde são usadas as fórmulas de transformação de Lorentz (que conduzem imediatamente a uma resposta correcta), mas só uma delas com sucesso;
- cinco respostas onde se manifesta a hesitação entre as duas últimas opções.

Mas as respostas mais significativas do ponto de vista do raciocínio espontâneo são as dos 9 professores que optaram pela segunda hipótese. Todas estas respostas, explícita ou implicitamente, apresentam a contracção do espaço ou do comprimento observado como justificação. O desfasamento temporal explicitamente referido no enunciado da questão não é tido em conta. Os professores, após terem admitido a contracção relativista, passam a considerar as distâncias com valores absolutos, não tendo em conta o facto de se verificar um desfasamento entre as obser-

vações que estão na origem das determinações dessas distâncias.

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES FINAIS

A história da ciência ao longo dos séculos revela-nos a dificuldade que os pensadores tiveram para se libertar de uma visão geocêntrica e antropomórfica do universo, no que se refere ao modo como iam interpretando os movimentos dos astros e outros fenómenos. Será de estranhar que em situações de relatividade de movimentos em que um dos referenciais está na Terra – afinal o referencial onde nascemos e vivemos toda a nossa experiência, tenhamos uma tendência mental para espontaneamente privilegiar o referencial terrestre?

A história da ciência dos finais do último século, e dos primórdios do nosso século, mostram-nos como extraordinários cientistas (tais como Lorentz, Poincaré e outros) não conseguiram libertar-se do estigma de um espaço absoluto newtoniano, tentando resolver as dificuldades levantadas pelo resultado negativo da experiência de Michelson-Morley sem abandonarem a ideia da existência do referencial newtoniano absoluto da Física clássica: o do éter.

Será de ficarmos admirados se apresentarmos uma tendência mental espontânea para descrever os movimentos nesse espaço intuitivamente absoluto, privilegiando assim uma das velocidades e um dos espaços físicos dos que estão envolvidos nas situações físicas?

Se as concepções do tempo absoluto e do carácter infinito da velocidade da luz, solidamente apoiados na nossa experiência diária, se enraizaram em tantas e algumas tão prodigiosas mentes ao longo dos séculos, porque estranhar que estejam enraizadas também nas nossas mentes?

Esta pesquisa mostrou que não são apenas os estudantes que mantêm em «estado latente» ideias espontâneas centradas em torno dos conceitos de espaço absoluto e movimento absoluto. (Villani e Pacca, 1990). Ela permitiu concluir que os professores do ensino secundário, independentemente da sua experiência e da sua formação académica, também revelam a presença dessas ideias espontâneas, as quais influenciam o modo como raciocinam perante situações menos familiares, principalmente quando não podem refugiar-se tanto em formalismos matemáticos rotineiramente aplicados.

Essas ideias espontâneas surgem enquadradas num esquema conceptual mais ou menos geocêntrico, a que poderemos chamar *cinemática espontânea*, e onde imperam noções tais como:

- a de espaço absoluto ligado a um referencial absoluto, onde as grandezas cinemáticas assumem valores considerados reais ou próprios;
- a de tempo absoluto, consequência de uma tendência para não assumir o carácter finito da velocidade da luz;
- a trajectória e a distância percorridas independentes dos referenciais.

Estas ideias acabam por se mesclar com as ideias relativistas, einsteineanas e galileanas, influenciando negativamente estas, e conduzindo a raciocínios híbridos inaceitáveis.

Esta pesquisa deverá ser tida em conta por aqueles que, em prol da louvável actualização do ensino da Física, defendem uma introdução urgente da teoria da relatividade restrita nos currículos do ensino secundário. Essa introdução, se por um lado nunca se deverá processar com prejuízo de outros conteúdos mais básicos, por outro lado deverá ser precedida por uma sólida formação dos professores, não só no domínio da própria relatividade restrita, mas também, e *fundamentalmente*, no domínio da relatividade galileana. Através da discussão de diversas situações experimentais, reais e conceptuais, de movimento relativo, e recorrendo à modelação em computador, deverá propiciar-se aos professores a oportunidade de confrontar as suas ideias baseadas numa cinemática espontânea com as evidências

experimentais, de modo a que eles se vão progressivamente libertando dessas ideias espontâneas. É com actividades no domínio da relatividade galileana que se poderá ajudar professores e alunos a libertarem-se de *esquemas alternativos* como o da velocidade absoluta e do espaço percorrido absoluto.

Só depois, com a penetração segura no domínio da relatividade restrita, os professores se irão libertando seguramente de outros esquemas alternativos tais como o do valor infinito da velocidade da luz, das distâncias absolutas e do tempo absoluto, sem caírem em raciocínios equivocados de ideias espontâneas desenquadradas da própria relatividade galileana, como se verificou nesta pesquisa.

BIBLIOGRAFIA

- SALTIEL, E. , MALGRANGE, J., *Spontaneous ways of reasoning in elementary Kinematics*, European Journal of Physics, vol. 2, pp. 73-80, 1980
- VILLANI, A.; PACCA, J., *Students' spontaneous ideas about the speed of light*, International Journal of Science Education, vol. 9 , pp. 55-66, 1987
- VILLANI, A.; PACCA, J., *Spontaneous reasoning of graduate students*, International Journal of Science Education, vol. 12 , pp. 589-600, 1990
- VILLANI, A., *Ideias espontâneas e ensino da Física*, Revista de Ensino de Física, vol. 11, pp. 130-147, 1989

Anexo

Instrumento de pesquisa

1. Especificações

As **respostas** às questões que se seguem são **confidenciais e impessoais**. Irão ser misturadas com muitas outras e só então analisadas numa perspectiva estatística. Para cumprirem o objecto de pesquisa a que se destinam, essas respostas deverão traduzir o mais fielmente possível as ideias de cada professor, pelo que lhe rogamos que **evite qualquer espécie de influência por parte dos outros professores**.

As respostas (que deverão ser escritas apenas na folha de respostas) só poderão cumprir as finalidades que delas se espera se forem **convenientemente fundamentadas**.

Todas as respostas que traduzem fielmente as concepções pessoais de cada professor acerca da interpretação de cada situação física apresentada serão **igualmente válidas** para os objectivos a que se destina esta pesquisa.

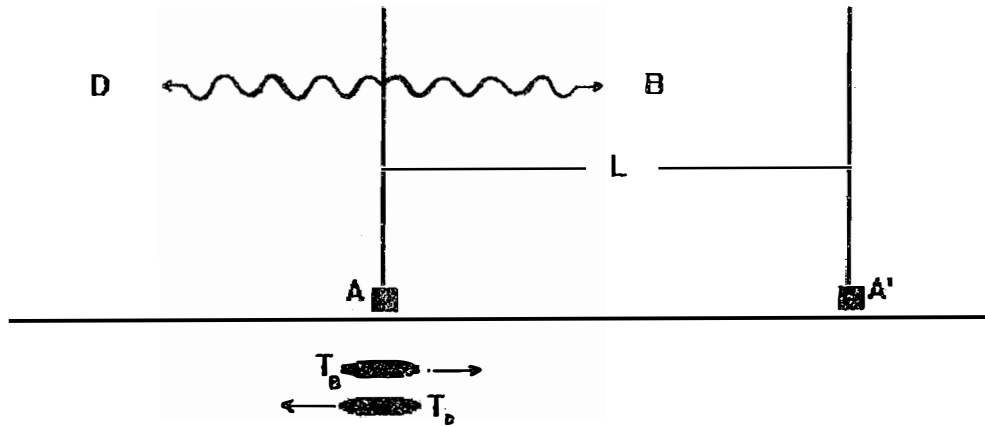
Ao responder de modo explícito e pessoal a estas questões estará a colaborar numa ampla investigação sem fronteiras que, alicerçada no **paradigma construtivista do conhecimento** do mundo, admite como verdadeiro o facto de as ideias empíricas e espontâneas que cada ser humano possui acerca de um fenómeno desempenharem um papel fundamental no domínio do enquadramento científico desse fenómeno.

As conclusões globais desta nossa pesquisa ser-lhe-ão comunicadas mais tarde, se as desejar conhecer, e delas se espera que todos nós, professores de Física, venhamos a beneficiar.

Antecipadamente lhe agradecemos a sua prestimosa colaboração.

2. Primeira situação física ¹

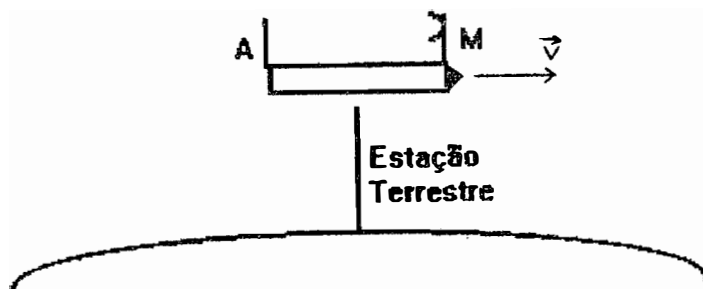
No momento em que dois veículos espaciais T_B e T_D , que viajam com a velocidade $v = \frac{c}{2}$ em sentidos opostos, passam pela antena A, esta emite dois sinais luminosos B e D em sentidos opostos mas na mesma direcção em que viajam os veículos ($c =$ velocidade da luz no vácuo)



- Q₁ – A que distância de A se encontrarão cada um dos veículos T_B e T_D e o sinal D quando B atravessar uma Antena A', que está à distância L de A? Porquê?
- Q₂ – Suponha que viajava em T_B . Para si, quando o sinal B atingisse a antena A', qual dos dois sinais luminosos estaria mais perto? Porquê?
- Q₃ – Suponha que viajava em T_D . Para si, quando B atingisse a antena A', qual dos dois sinais luminosos estaria mais perto? Porquê?

3. Segunda situação física ²

Um foguetão de comprimento L possui uma antena A na sua extremidade traseira e um espelho M na sua extremidade dianteira. Quando o foguetão, que viaja a uma velocidade $v = \frac{c}{2}$, passa por cima de uma estação terrestre, a antena A emite um sinal luminoso que, após atingir o espelho M, é reflectido e regressa à antena A.



- Q₄ – Para alguém que viaje no foguetão, o sinal gasta mais tempo a ir da antena A ao espelho M ou a regressar do espelho M à antena A? Porquê?
- Q₅ – Para alguém que se encontre na estação terrestre, o sinal luminoso gasta mais tempo a ir da antena A ao espelho M ou a regressar do espelho M à antena A? Porquê?
- Q₆ – O sinal luminoso gasta mais tempo a percorrer a distância de A a M para alguém no foguetão ou para alguém na estação? Porquê?
- Q₇ – O sinal luminoso gasta mais tempo a percorrer a distância de M a A para alguém no foguetão ou para alguém na estação? Porquê?

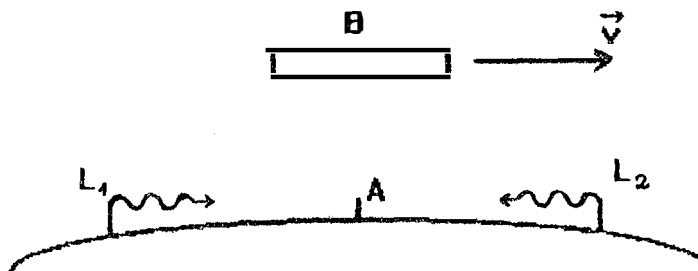
¹ As questões referentes a esta situação são da autoria dos investigadores da Universidade de São Paulo, Professores Alberto Villani e Jesuina Pacca e foram transcritas do International Journal of Science Education, vol. 9, n.º 1, de 1987.

² As questões referentes a esta situação física têm a mesma origem das anteriores.

4. Terceira situação física

São emitidos dois sinais electromagnéticos por dois postos emissores L_1 e L_2 fixos na Terra. Essas emissões são observadas simultaneamente por um observador A terrestre que mede a distância Δx entre esses dois postos emissores.

Um outro observador B, deslocando-se num foguetão com uma velocidade $v = \beta c$, observa as emissões dos dois sinais desfasadas de um tempo cujo módulo é $\Delta t'$.



Q8 – Indique, justificando, qual das seguintes expressões permitirá obter a distância entre os referidos emissores medida pelo observador B do foguetão?

- $\Delta x' = \Delta x$
- $\Delta x' = \Delta x \sqrt{1 - \beta^2}$
- $\Delta x' = \Delta x \sqrt{1 - \beta^2} - v \Delta t'$
- $\Delta x' = \Delta x \sqrt{1 - \beta^2} + v \Delta t'$

RESUMO

Algumas características do pensamento espontâneo dos estudantes de Física, no domínio da cinemática, foram registadas por Saltiel e Malgrange (1980, p. 73). Estas características foram confirmadas por Villani e Pacca, ao analisarem as respostas dadas por um grupo de estudantes brasileiros graduados em Física a dois problemas acerca da velocidade da luz e mudança de referencial (1987, pp 55-66).

No final de duas acções de formação sobre a teoria da relatividade restrita que orientámos na região da grande Lisboa, tivemos a oportunidade de ministrar os dois problemas de Villani e Pacca e uma outra questão acerca da relatividade do movimento. Analisámos as respostas dadas por 53 professores do ensino secundário com uma experiência de ensino muito variável (desde 39 anos de ensino a 1 ano apenas) e encontrámos o mesmo tipo de raciocínio espontâneo observado nos estudantes brasileiros.

RÉSUMÉ

Saltiel et Malgrange (1980, p. 73) ont défini quelques caractéristiques du raisonnement spontané des élèves de Physique, en rapport avec la cinématique. Cette caractéristiques ont été confirmée par Villani et par Pacca en 1987, quand ils ont analysé les réponses données, par un groupe d'étudiants brésiliens gradués en Physique, à deux problèmes sur la vitesse de la lumière et le changement de repère (1987, pp. 55-66).

Dans la région de la grande Lisbonne, nous avons réalisé deux cours de formation, qui concernaient la théorie de la relativité. À leur fin, nous avons eu l'occasion de proposer les deux problèmes de Villani et de Pacca et un autre, qui se rapportait à la relativité du mouvement. Nous avons analysé les réponses données par 53 professeurs de l'enseignement secondaire ayant une expérience professionnelle très variée (entre 39 ans et 1 an d'enseignement) et nous avons trouvé le même type de raisonnement spontané observé chez les étudiants brésiliens.

ABSTRACT

Some characteristics of spontaneous thinking in physics students in relation to kinematics were recorded by Saltiel and Malgrange (1980, p. 73). These characteristics were confirmed by Villani and Pacca in 1987, when they analyzed the answers

given by a group of Brazilian physics graduate students to two problems on the speed of light and the change of the frame of reference (1987, pp 55-66).

At the end of two formative courses about the special relativity we have given in greater Lisbon, we have had the opportunity to administer the two Villani and Pacca' problems and another question about the relativity of motion. The answers of 53 secondary teachers with a great range of experience on teaching (varying from 39 years of teaching to 1 year) were analyzed and we found the same kind of spontaneous thinking observed in the Brazilian students.

APÊNDICE II

CONCEPÇÕES EPISTEMOLÓGICAS DOS PROFESSORES SOBRE O CONHECIMENTO FÍSICO

CONCEPÇÕES EPISTEMOLÓGICAS SOBRE O CONHECIMENTO FÍSICO

Neste instrumento de pesquisa são feitas várias afirmações relacionadas com a natureza da Física e do conhecimento do mundo que esta ciência proporciona. Solicitamos-lhe que reflecta sobre cada uma dessas afirmações e coloque uma cruz de modo a indicar o seu grau de concordância ou discordância com cada uma delas.

Pedimos-lhe que não se influencie por outras opiniões. Exprima com toda a frontalidade a sua opinião pessoal.

A escala proporciona as seguintes quatro opções:

A	B	C	D
Discordo convictamente	Discordo	Concordo	Concordo convictamente

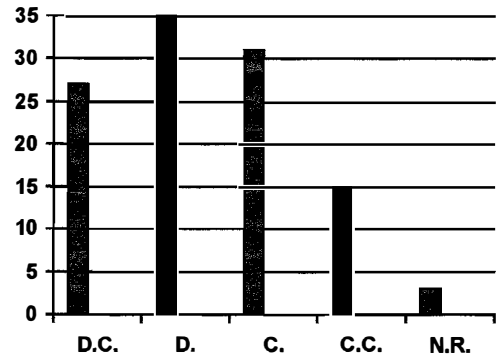
ESCALA

	A	B	C	D
1 - A ciência física não pode ter como objectivo o conhecimento pleno da realidade exterior				
2- Há uma dialéctica entre a razão e a experiência no estabelecimento da ciência física				
3- A Física é uma construção humana resultante da interacção entre o sujeito e o objecto, entre o pensamento e a acção.				
4- O conhecimento físico de cada ser humano é uma construção pessoal e idiossincrásica.				
5- O pensamento vulgar antecede o pensamento científico e constitui um obstáculo à construção deste.				
6- Na comunidade dos físicos e dos professores de Física campeiam ideias demasiado realistas e empiristas.				
7- Há um isomorfismo entre as construções do conhecimento físico por cada indivíduo e ao longo da história.				
8- Não há um método científico mas, sim, uma atitude científica. Hipóteses, modelos e experimentação interagem não linearmente.				
9- A demarcação entre a ciência e a não ciência nem sempre é nítida.				

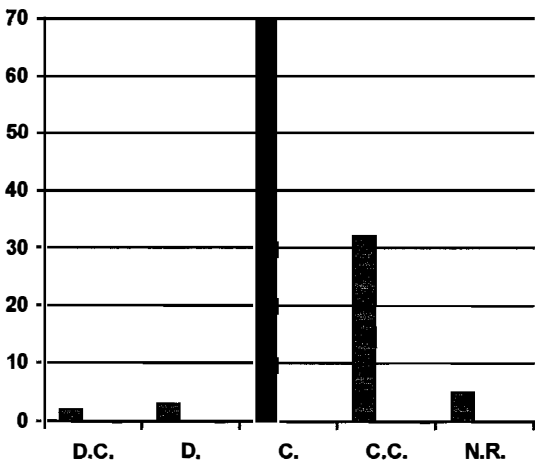
A terminar, indique-nos, por favor, qual ou quais das seguintes situações lhe corresponde:

A - Sou professor de Física do ensino básico e secundário	
B - Sou investigador em educação em Física	
C- Sou investigador em Física	

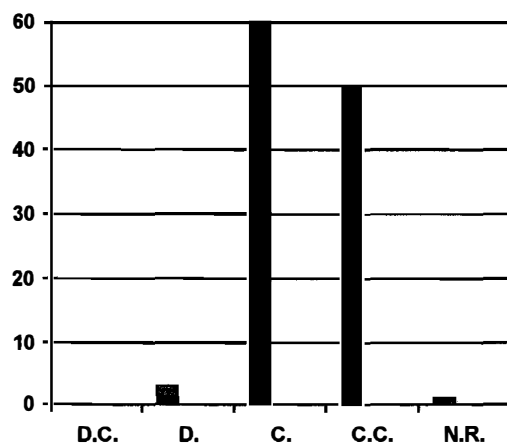
A ciência física não pode ter como objectivo o conhecimento pleno da realidade exterior.



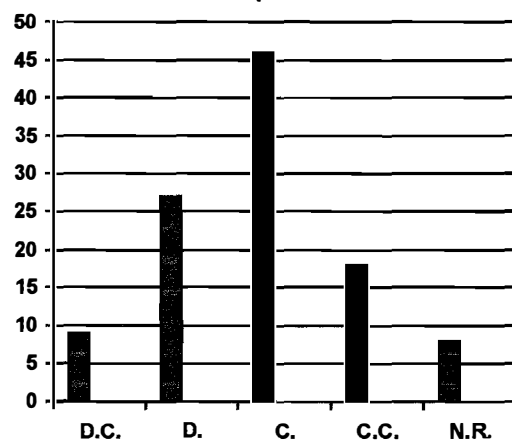
Há uma dialéctica entre a razão e a experiência no estabelecimento da ciência física.



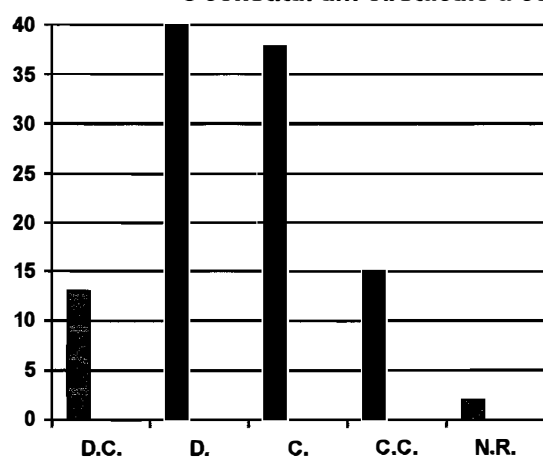
A Física é uma construção humana resultante da interacção entre o sujeito e o objecto, entre o pensamento e a acção.



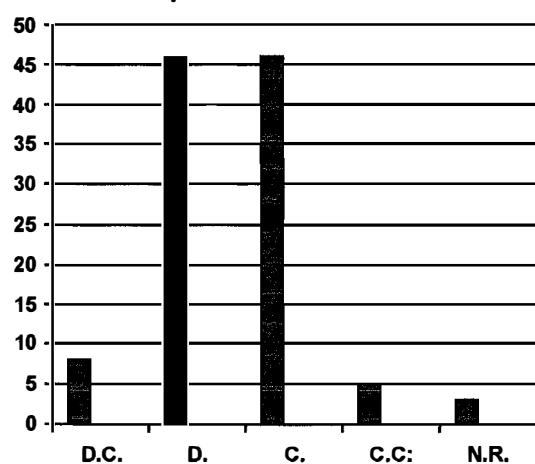
O conhecimento físico de cada ser humano é uma construção pessoal e idiossincrásica.



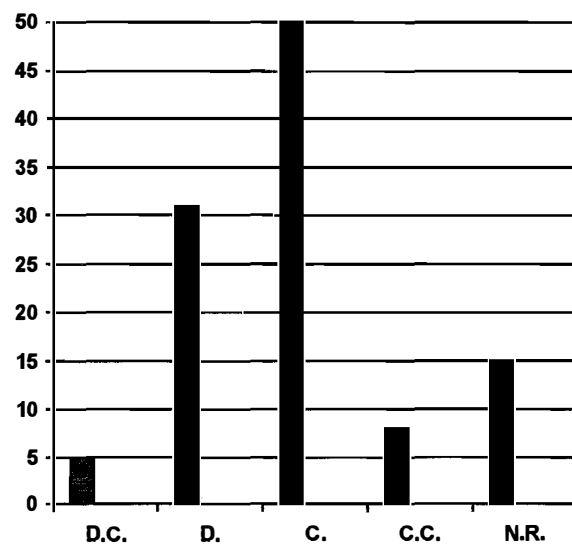
**O pensamento vulgar antecede o pensamento científico
e constitui um obstáculo à construção deste.**



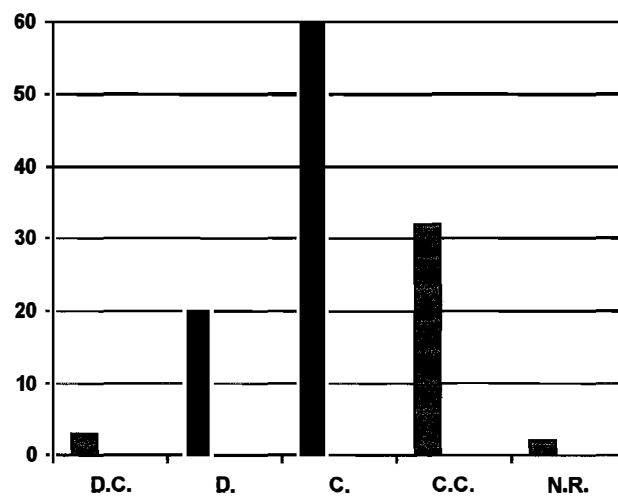
**Na comunidade dos físicos e dos professores de Física
campeiam ideias demasiado realistas e empiristas.**



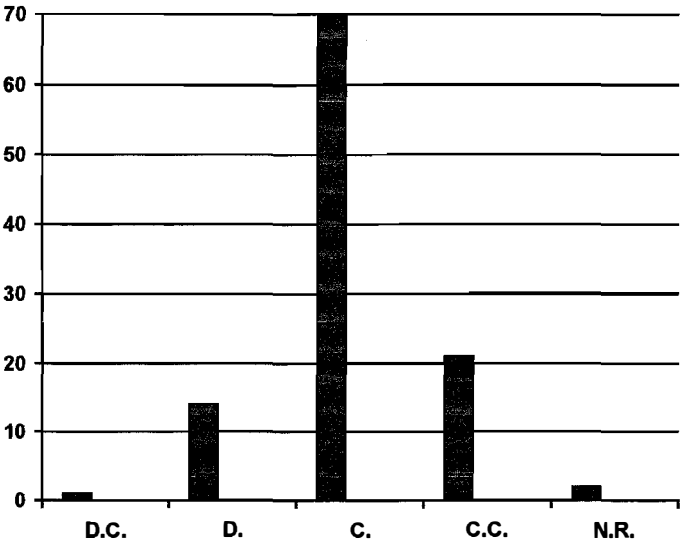
Há um isomorfismo entre as construções do conhecimento físico por cada indivíduo e ao longo da história.



**Não há um método científico mas, sim, uma atitude científica.
Hipóteses, modelos e experimentação interagem não linearmente.**



A demarcação entre a ciência e a não ciência nem sempre é nítida.



APÊNDICE III

O CONCEITO DE MASSA

I - INTRODUÇÃO HISTÓRICA

O Conceito de Massa. I. Introdução Histórica

(The concept of mass. I. Historical introduction)

Jorge António Valadares

Universidade Aberta, 1000 Lisboa, Portugal

Recebido para publicação em 20 de Janeiro de 1993; Aceito para publicação em 30 de Agosto de 1993

Resumo

Recorremos, neste primeiro artigo, a uns apontamentos da história da evolução das idéias relativistas para tentar mostrar como a idéia de massa relativista é muito menos consistente do ponto de vista histórico do que se poderá julgar. Vimos como o conceito de massa dependente da velocidade apareceu antes de Einstein interligado com outros conceitos hoje inaceitáveis, como seja, por exemplo, o de os corpos serem deformáveis dinamicamente por ação de forças quando se movem a altas velocidades. Vimos como Einstein só introduziu o conceito de massa dependente da velocidade por razões que julgamos serem apenas históricas, já que não mais explorou esse conceito, e veio mais tarde a renegá-lo. Num segundo artigo apresentaremos outro tipo de argumentos a favor da eliminação da massa relativista, e de outras concepções mal fundamentadas do domínio relativista.

Abstract

In this first paper, we appeal to some notes on the history of the evolution of relativistic ideas attempting to show that, from the historical point of view, the idea of relativistic mass is much less consistent than one could expect. We see that the concept of velocity dependent mass appeared, before Einstein, associated to other concepts which today are unacceptable, such as that bodies are dynamically deformed when they move at high speeds. We see that Einstein introduced the concept of velocity dependent mass due to reasons that we consider just historical, since he did not explore this concept anymore, and later on he renegated it. In a second paper we will present another kind of argument in favor of the suppression of the concept of relativistic mass, as well as of other conceptions badly grounded in the relativistic domain.

I. Introdução histórica

Este é o primeiro de dois artigos acerca do conceito de massa. Pretende-se, com eles, alertar os professores para a necessidade de alterar algumas concepções tradicionais acerca do conceito de massa, defendendo a idéia de que apenas a massa em repouso deve ser considerada como medida da inércia. Distingue-se a massa própria como um caso particular da massa em repouso com o estatuto de propriedade das partículas, e também se procura clarificar o significado de massa de um sistema. Partindo de considerações históricas, no primeiro artigo, e através de novos significados con-

ceituais, no segundo artigo, advoga-se a abolição do conceito histórico de massa relativista e das idéias de que a massa se converte em energia e vice-versa.

I.1. Evolução do conceito antes de Einstein

Desde a antiguidade que a palavra massa representa vulgarmente um pedaço de um material, preferencialmente na forma de pasta. Isaac Newton atribuiu à palavra massa o significado de quantidade de matéria (Newton, 1990, p.1) definindo a massa de um corpo pelo produto do seu volume pela densidade da substância que o constitui.

Esta definição de massa constitui um ciclo vicioso

já que a densidade é ela própria definida a partir da massa. Embora Newton tenha estabelecido de modo claro o conceito de inércia de um corpo e associado este à sua massa, foi Leonhard Euler quem primeiro definiu operacionalmente a massa, como medida da inércia de um corpo, através do quociente da força que nele atua pela aceleração resultante: $m = F/a$ ¹ (Baierlein, 1991, p. 172).

No quadro conceitual da Mecânica newtoniana, esta *massa inercial* de um corpo nada tem que ver com a sua massa gravitacional. A primeira destas duas grandezas quantifica a inércia do corpo, isto é, a oposição que ele oferece à mudança da velocidade por ação das forças. Da segunda grandeza depende proporcionalmente a força exercida pelo campo gravitacional no corpo. A primeira mede-se por um processo dinâmico, dividindo uma força aplicada ao corpo pela aceleração nele produzida. A segunda mede-se por um processo estático através do equilíbrio de forças numa balança de pratos.

Na Mecânica newtoniana apareceram diversos conceitos de massa inercial, cada uma das quais corresponde a um aspecto diferente que tem que ver com a inércia (Couderc, 1977, p.92).

Assim, por exemplo, se a força atua num corpo na direção da velocidade, esta só muda de valor, mas não em direção. A resistência a essa mudança do valor da velocidade é medida pela chamada *massa longitudinal*.

Se a força atuar perpendicularmente à velocidade, apenas faz variar a direção desta. A resistência a esta mudança de direção é medida pela *massa transversal*.

Apareceram ainda outras massas na Física anterior a Einstein, por exemplo a *massa maupertuisiana*, definida por Henri Poincaré, a *massa cinética*, etc, mas o que é importante é que *todas as medidas até hoje efetuadas, a baixas velocidades comparadas com a da luz, das diversas massas de um corpo, conduziram sempre a igual valor*.²

O extraordinário poder preditivo da Mecânica new-

toniana e a sua elevada coerência interna conduziram à convicção da maioria dos físicos do século passado de que a referida Mecânica era um edifício praticamente acabado e imune a qualquer crítica. Muito poucos se aperceberam das debilidades dos seus fundamentos. Um dos críticos mais perspicazes relativamente aos fundamentos da Mecânica newtoniana foi o físico e filósofo neo-positivista austríaco Ernest Mach (1838-1916). Criticando as concepções newtonianas de espaço e tempo absolutos, viria a exercer uma enorme influência no pensamento de Albert Einstein. Segundo Mach, todas as coisas do mundo dependem umas das outras. O espaço e o tempo são grandezas eminentemente relativas e todas as massas estão relacionadas entre si desempenhando as acelerações um papel fundamental nessas relações.

Em 1904, Lorentz publicou a versão final e mais completa da sua *Eletrodinâmica dos corpos em movimento* onde considera o elétron como uma esfera carregada e deformável. Com esta teoria, Lorentz pretendia interpretar os resultados contraditórios de diversas experiências no quadro conceitual da Física clássica onde se admite a existência do éter luminífero e do referencial absoluto nele apoiado, com a conseqüente existência do espaço e tempo absolutos. Um dos resultados dessa teoria é que a massa longitudinal e a massa transversal do elétron dependem da sua velocidade, sendo essas dependências traduzidas pelas expressões

$$m_l = k \cdot e^2 / Rc^2 \cdot 1 / (1 - v^2/c^2)^{3/2}$$

$$m_t = k \cdot e^2 / Rc^2 \cdot 1 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$$

onde R representa o raio do elétron, e a sua carga, c a velocidade da luz no vácuo e k é uma constante numérica.

Estas grandezas são designadas por massas eletromagnéticas dado que, na base da dedução das suas expressões, está a teoria eletrodinâmica de Lorentz, teoria essa que pressupõe o elétron com uma estrutura e dimensões deformáveis por ação de forças de interação com o éter. Lorentz afirma que a massa de todas as partículas varia com a velocidade do mesmo modo que

¹Para garantir o máximo de homogeneidade de notação, não respeitaremos as letras que os diversos autores citados utilizam para representar as várias grandezas físicas.

²Eotvos realizou experiências com precisão 10^{-6} e Dicke atingiu a precisão de 10^{-11} .

o elétron, “desde que se admita que as suas massas são influenciadas por uma translação no mesmo grau em que o são as massas eletromagnéticas dos elétrons” (1972, p.38).

Nesse célebre artigo de 1904, Lorentz admite que, para além das massas transversal e longitudinal dependentes da velocidade, “não existe qualquer massa verdadeira ou material” (1972, p.30). Mas não foi ele o primeiro físico a propor a idéia de dependência da massa com a velocidade. Já em 1903 Max Abraham tinha proposto uma outra teoria que previa dependências da massa com a velocidade diferentes da de Lorentz.

Como para baixas velocidades as previsões de Lorentz e Abraham só diferiam na parcela de ordem $(v/c)^2$, tornava-se experimentalmente difícil resolver o diferendo entre as duas teorias (Ron, 1983, p. 48).

É importante notarmos que em qualquer das teorias que referimos que previam a dependência da massa com a velocidade, as grandezas *massa e energia eram absolutamente distintas*.

Foi Poincaré, numa comunicação de 1900 intitulada *A teoria de Lorentz e o princípio da reação*, quem pela primeira vez caracterizou a energia como “um fluido impregnado de inércia” (Jammer, 1961, p.175). Tendo em conta a relação maxwelliana entre a quantidade de movimento e a energia de uma pequena porção de luz

$$p = E/c$$

e definindo newtonianamente a quantidade de movimento dessa porção por $p = mc$, Poincaré concluiu que a referida porção de luz deveria possuir a massa inercial

$$m = E/c^2 \quad (\text{Okun, 1989, p33}).$$

Que poderemos inferir deste período histórico pré-relativista de que acabamos de dar um pequeno esboço relativo apenas à parte que aqui nos interessa?

Em primeiro lugar que na Física clássica surgiram várias massas todas elas procurando traduzir a inércia dos corpos. Em segundo lugar que a idéia da existência de massa inercial variável com a velocidade surgiu antes de Einstein, no quadro conceitual da Mecânica clássica e com base em teorias que referiam alterações estrutu-

rais dos corpos. E, finalmente, que a legendária fórmula

$$E = mc^2$$

que Okun considera “um elemento de cultura de massas” (1989, p. 35), também foi introduzida antes de Einstein com um significado limitativo, e não com o significado que mais tarde Einstein viria a atribuir-lhe e a que nos referiremos na secção seguinte.

1.2. Evolução das idéias einsteinianas sobre a massa na TRR

Em 1905, Einstein publicou nos *Annalen der Physik* alguns artigos notáveis. Um deles, intitulado *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (Sobre a Eletrodinâmica dos corpos em movimento), contém um corpo teórico conhecido como teoria da relatividade restrita (TRR) e que veio resolver, de modo brilhante e revolucionário, o conflito conceitual entre o princípio da relatividade, as rigorosas equações de Maxwell e as fórmulas de transformação de Galileu, conflito esse que constituía uma das grandes dificuldades com que se debatia a Física clássica. Dizemos de modo brilhante porque, baseada em dois pressupostos apenas, essa teoria veio explicar de maneira simples os resultados de experiências “rebel-des” no que se refere à Física newtoniana (tais como as experiências de Michelson-Morley e de Fizeau) e prever um grande número de resultados que, de então para cá, foram sendo sobejamente confirmados. E de modo revolucionário porque envolveu uma reformulação dos pilares da Mecânica, esse maravilhoso *edifício* que nos finais do século passado parecia praticamente definitivo mas que afinal estava bem longe disso...

O artigo de Einstein sobre a TRR começa com uma introdução onde Einstein formula os dois célebres postulados com base nos quais constrói toda a sua teoria, a saber:

- o *princípio da relatividade*, segundo o qual as leis da Física são as mesmas em todos os referenciais de inércia;
- o *princípio da constância da velocidade da luz*, segundo o qual a velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor em todos os referenciais inerciais.

Seguem-se duas partes, a *parte cinemática* e a *parte eletrodinâmica*. A última seção da segunda parte intitula-se dinâmica do elétron (lentamente acelerado). Nesta última seção, a determinada altura, Einstein “procura, cedendo a concepções habituais (o sublinhado é nosso), a *massa longitudinal* e a *massa transversal* do elétron”. Que querará dizer Einstein com “ceder a concepções habituais”? Julgamos que Einstein cedeu, de fato, a concepções históricas, que têm que ver com a polémica entre teorias rivais (a de Lorentz e a de Abraham) que referiam mais que uma massa inercial, dependente da velocidade, com expressões diferentes para essa dependência. Mas Einstein parece não estar muito convencido da verdadeira fundamentação científica dessas fórmulas de definição já que, nunca mais, nesses famosos artigos, ele se refere a elas ou delas tira qualquer consequência (por exemplo, acerca da natureza limite da velocidade da luz, como tantas vezes se vê fazer) e, mais tarde, viria mesmo a renegá-las, conforme veremos.

As fórmulas que Einstein deduziu são as seguintes (ver nota da p. 1)

$$\text{massa longitudinal} = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\text{massa transversal} = \frac{m}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Nestas fórmulas, m é a massa do elétron “enquanto o movimento for lento” (Einstein, 1972 p.81). Note-se que a fórmula da massa transversal nem está correta. Foi Planck que a apresentou corrigida em 1906 (Adler, 1987, p.742).

Após a apresentação destas fórmulas, Einstein escreveu: “É claro que se obteriam outros valores para as massas se se empregassem outras definições para a força e para a aceleração”.

Neste trabalho original, logo a seguir à apresentação das fórmulas das massas, Einstein calcula a energia cinética do elétron

$$E_c = mc^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right\}$$

e mostra que uma velocidade $v = c$ tornaria E_c infinitamente grande.

No mesmo número dos *Annalen der Physik* Einstein apresenta um outro importante artigo: “Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?” (A inércia de um corpo depende do seu conteúdo energético?). Neste artigo Einstein considera um corpo em repouso num referencial inercial a emitir duas ondas luminosas transportando cada uma a energia $E/2$ em sentidos opostos. Dado que as emissões são simétricas, o corpo perde energia mas o seu momento conserva-se, permanecendo, pois, em repouso nesse referencial. Considerando depois a mesma emissão do ponto de vista de um outro referencial inercial que se move com velocidade v em relação ao primeiro, Einstein acaba por atingir, com base no princípio da relatividade, a expressão

$$E_{c0} - E_{c1} = E \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right\}$$

onde E_{c0} e E_{c1} são as energias cinéticas do corpo com respeito ao referencial em que a sua velocidade é v , respectivamente antes e após a emissão da energia luminosa E . E conclui pois, que a energia cinética do corpo, no referencial em que se move com a velocidade v diminui em consequência da emissão da energia luminosa E . Desprezando quantidades de quarta ordem e ordens superiores a essa, obtém

$$E_{c0} - E_{c1} = \frac{E v^2}{c^2 2}$$

E conclui esse importante artigo escrevendo: “Se um corpo perder a energia E em forma de radiação, a sua massa sofre a diminuição E/c^2 . É claro que nada importa ser ou não direta a transformação da energia saída do corpo em energia de radiação, de modo que somos assim conduzidos às seguintes conclusões gerais: A massa de um corpo é uma medida do seu conteúdo energético; se a energia sofrer uma variação igual a E , a sua massa sofrerá, no mesmo sentido, uma variação igual a $E/9.10^{20}$ (note-se que no sistema de unidades CGS a velocidade da luz tem o valor 3.10^{10} cm/s). Não está fora do possível que, em corpos de conteúdo energético altamente variável

(por ex., os sais de rádio), se venha a encontrar uma prova a que esta teoria se possa sujeitar. Se a teoria corresponder aos fatos, então a radiação é um veículo de inércia entre os corpos emissores e os absorventes". (os sublinhados e a referência ao sistema CGS não constam do texto que aqui se reproduz no qual Einstein usa as letras L em vez de E e k em vez de E_c).

Os aspectos que nos interessa aqui realçar são os seguintes:

1. Einstein afirma que *a massa inercial de um corpo varia* não porque varia a sua velocidade mas sim *porque varia a energia que ele contém*.
2. A relação que ele estabelece é uma *relação entre a variação da massa de um corpo num referencial em que está em repouso, m , e a variação do seu conteúdo de energia*, isto é, da energia que o corpo possui independentemente de ter energia cinética ou não:

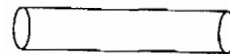
$$\Delta m = \Delta E_0/c^2$$

3. Einstein relaciona a radiação com a inércia pelo fato de a energia radiante, como qualquer energia fornecida (ou retirada) a um corpo, aumentar (ou diminuir) a massa inercial desse corpo. Mas *não refere* em parte alguma deste artigo *que a radiação tem inércia e muito menos que tem massa*. Sabemos o que se passa quando um corpo emite calor para outro: a energia interna de um aumenta, a energia interna do outro diminui, mas o calor que transita não é energia interna. Porque não aceitar algo de análogo quando um corpo emite luz para outro? A massa do corpo emissor diminui, a do corpo receptor aumenta, mas isso não obriga a que a luz seja energia com massa.

A demonstração que Einstein apresentou para a equivalência entre a massa de um corpo e o seu conteúdo energético tem sido apelidada de falaciosa por diversos físicos. John Stachel e Roberto Torretti mostram que tal não é verdade (remetemos o leitor interessado nesta questão para o artigo destes dois físicos referido na bibliografia).

Em 1906, Einstein analisa a célebre experiência conceitual do cilindro oco que emite um *flash* de luz de uma

das suas extremidades e o absorve na outra.



Considerando o momento

$$p = E/c,$$

que a teoria eletromagnética já permitira conhecer desde o século passado, e tendo em conta a lei da conservação do momento do sistema *total*, ele chega facilmente à seguinte conclusão: a extremidade que emite a luz diminui de massa e a extremidade que a absorve aumenta de massa sendo a medida de qualquer das variações dada por

$$\Delta m = \Delta E/c^2$$

cada vez que é transferida a energia luminosa ΔE .

Em 1916, Einstein escreveu uma obra particularmente destinada a quem, "sem dominar o aparato matemático da Física teórica, tem interesse na teoria do ponto de vista científico e filosófico" (Einstein, 1916, prólogo). No parágrafo 15 da primeira parte dessa obra, dedicada à teoria da relatividade restrita (a segunda parte diz respeito à teoria da relatividade geral) são apresentados os resultados gerais da teoria. É lá que, após uma consideração acerca da importância que a relatividade teve para o conceito de massa, podemos ler o seguinte: "... se um corpo absorve a energia E_0 , a sua massa inercial cresce de E_0/c^2 ; a massa inercial de um corpo não é uma constante mas sim variável *segundo a modificação da sua energia*. A massa inercial de um sistema de corpos deve ser encarada precisamente como uma medida da sua energia. *O postulado da conservação da massa de um sistema coincide com o da conservação da energia e só é válido na medida em que o sistema não absorve nem emite energia.*" (p. 45). Em todo o estudo que faz acerca da massa, Einstein está a considerar um sistema de coordenadas solidário com o corpo, conforme refere em notas de rodapé. Torna-se pois evidente que Einstein não está a considerar outra massa que não seja a massa em repouso (sem sequer falar nesta designação pois não se vislumbra outra) e destaca-a bem da energia exterior aos corpos,

associando-a sempre à energia neles contida. Realçamos acima de tudo o fato de Einstein também não se referir neste livro de índole didática à variação da massa com a velocidade.

Mas é na sua última fase de vida que a posição de Einstein acerca da massa se torna ainda mais explícita. Assim, por exemplo, numa carta a Lincoln Barmet declara o seguinte: “Não é bom introduzir-se o conceito de massa

$$M = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

de um corpo em movimento para o qual nenhuma definição clara pode ser dada. É melhor não introduzir outro conceito de massa a não ser o de massa em repouso m . Em vez de introduzir M é melhor mencionar a expressão para o momento e energia de um corpo em movimento” (Okun, 1989, p.32 e Adler, 1981, p.742).

Um dos mais notáveis livros que Einstein escreveu e que esgotou várias edições e imensas reimpressões intitula-se *O Significado da Relatividade*. A sua 5ª edição constitui, no dizer do Prof. Mário Silva, que a traduziu para a língua portuguesa, “a derradeira mensagem que Einstein dirigiu, ainda em pleno vigor da sua capacidade intelectual” (introdução à edição portuguesa). Na p.57, é tratado o tema massa, numa seção intitulada *Massa e energia*. Trabalhando no espaço de Minkowski, portanto a quatro dimensões, e num sistema de unidades em que $c = 1$, Einstein deduz as componentes do tensor momento-energia

$$I_x = \frac{mv_x}{\sqrt{1 - v^2}} \quad \dots \quad E = \frac{m}{\sqrt{1 - v^2}}$$

em que $\vec{v}$ é a velocidade. E faz, a seguir, duas observações:

- que estas componentes da quantidade de movimento coincidem com as da Mecânica clássica para velocidades pequenas quando comparadas com a da luz;
- que considerando uma partícula em repouso ($v = 0$) vemos que a energia E_0 de um corpo em repouso é igual à sua massa.

E prossegue: “Se tivéssemos escolhido o segundo

como a nossa unidade de tempo teríamos obtido

$$E_0 = mc^2$$

Massa e energia são portanto essencialmente idênticas; elas são apenas expressões diferentes da mesma entidade. A massa de um corpo não é uma constante; varia com as variações da sua energia.”

Importa realçar que Einstein:

1º - associa a massa ao conteúdo energético das partículas quando em repouso, escrevendo

$$E_0 = mc^2 \quad \text{e não} \quad E = mc^2;$$

2º - refere mais uma vez a variação de massa com a energia e não com a velocidade.

Julgamos poder concluir que a idéia mais importante e perene que Einstein estabeleceu acerca da **massa** é a de que esta grandeza constitui uma **propriedade do corpo que é essencialmente idêntica à energia que ele contém** e que **mede a sua inércia**. A idéia de que a massa depende da velocidade apareceu em Einstein como um resquício histórico de que mais tarde se libertou.

Se a massa de um corpo é uma propriedade do corpo que mede a sua inércia e equivale ao conteúdo de energia que contém, poderá ser outra que não a massa em repouso (ou, se preferirmos, a massa quando a velocidade é do domínio newtoniano)? Julgamos que não e esforçar-nos-emos por fundamentá-lo de outro modo no artigo seguinte. Mas antes vamos referir, sucintamente, algumas idéias pós-relativistas de outros físicos acerca da massa.

Como tantas vezes tem sucedido na história da ciência, outros físicos são muito mais responsáveis que Einstein por determinadas idéias *einsteinianas*. Entre estas conta-se a de que a massa aumenta com a velocidade.

Em 1912, Tolman não hesitou em adotar a definição clássica de momento $\vec{p} = m\vec{v}$ ao domínio relativista e, assim, foi conduzido à expressão

$$M = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

O mesmo fez Pauli em 1921, quando ainda era um brilhante estudante de 21 anos de idade, com a agravante

de este seu trabalho ter sido dos mais utilizados por muitos físicos devido à reputação do seu autor.

Os grandes físicos soviéticos Landau e Lifshitz, na importante obra Teoria Clássica dos Campos, aboliram completamente a noção de massa relativista tão divulgada em muitas obras desde sempre e, segundo Okun, teriam sido pioneiros nessa sua atitude (1989, p.35). De então para cá, muitas obras, principalmente as que fazem abordagens mais formais baseadas na geometria espaço-temporal, aboliram totalmente a massa relativista ou massa dependente da velocidade. E os mais recentes cursos que temos consultado, mesmo a níveis introdutórios, ou não falam dela ou referem-na apenas para a criticar.

Os físicos que mais poderiam trabalhar com a massa relativista não o fazem. É caso para dizer-se que para eles *massa só há uma: a massa em repouso e mais nenhuma*.

Na opinião de Baierlein, a decisão de escolher a definição de massa e, portanto, de adotar ou não a massa relativista, é uma questão semântica (1989, p.172). Na opinião de R. Resnick e D. Halliday é uma questão de gosto (1985, p.98). Também A. French o considera uma questão de preferência (1988, p.25). Em nossa opinião não é apenas uma questão de gosto ou semântica ainda que aceitemos que alguns bons livros, e não muito antigos, abordam a TRR explorando a massa relativista (a última versão de Resnick e Halliday de um livro que publicaram sobre a Física relativista e a Física quântica, e que indicamos em referência, é disso um bom exemplo). A massa relativista é, quanto a nós, uma interpretação inaceitável, uma *misconception*, do conceito de massa, conforme tentaremos fundamentar por outra via no próximo artigo.

Agradecimentos

Desejo manifestar desde já a minha gratidão aos Professores Armando Rocha Trindade, Carlos Fiolhais, Helena Caldeira, Luis Silva e Teresa Gonçalves pelas críticas e sugestões a estes dois artigos que escrevi sobre o conceito de massa.

Bibliografia

- C. Adler, *Does mass really depend on velocity, dad?* Am. J. Phys. 55 (8), August 1987.
- G. Alcaine, *Sobre masa y energía*, Revista Española de Física, 3, 1 1989.
- R. Baierlein, *Teaching $E = mc^2$* , The Physics Teacher, March 1991.
- A. Brotas, *O essencial sobre a teoria da relatividade*, INCM, Lisboa, 1988.
- P. Couderc, *La relativité*, Col. que sais-je?, P.U.F., 16ª ed., 1977.
- P. Couderc, F. Perrin, *a Relatividade*, edições 70, Lisboa, 1984.
- H. Couny, *Albert Einstein e a relatividade*, ed. Ulisseia, Lisboa, 1965.
- A. Einstein, *O significado da relatividade*, Ed. Arménio Amado, Coimbra, 1958.
- A. Einstein, *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento*, in TEXTOS FUNDAMENTAIS DA FÍSICA MODERNA, I volume - O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE, Fund. Calouste Gulbenkian, 1972
- A. Einstein, *A inércia de um corpo será dependente do seu conteúdo energético?*, in TEXTOS FUNDAMENTAIS DA FÍSICA MODERNA, I volume - O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE, Fund. Calouste Gulbenkian, 1972
- A. Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, Alianza Editorial, Madrid, 1984.
- A. Einstein, *Notas autobiográficas*, Alianza Editorial, Madrid, 1984.
- A. French, *Relatividad especial- MIT Physics Course*, Ed. Reverté, s.a. Barcelona, 1988.
- L. Infeld, *Albert Einstein*, Pub. Europa-América, Lisboa, s/d.

- M. Jammer, *Concepts of mass*, Harvard University Press, Cambridge-Massachusetts, 1961.
- B. Kuznetsov, *Albert Einstein*, 2 vol, Ed. Presença, Lisboa, s/d.
- La Teoría de la Relatividad*, Selección de L. Pearce Williams, Alianza Universidad, Madrid, 1984.
- L. Landau, Y. Rumer, *O que é a relatividade?*, Portugália Edit., Lisboa, 1965.
- L. Okun, *The concept of mass*, Physics Today, June 1989.
- A. Pais, *Subtil é o Senhor*, Edit. Gradiva, Lisboa, 1993.
- R. Resnick, *Introdução à relatividade especial*, Ed Univers. S. Paulo, 1971.
- R. Resnick, D. Halliday, *Basic concepts in relativity and early quantum theory*, sec. ed., John Wiley & Sons, New York, 1985.
- F. Rohrlich, *An elementary derivation of $E = mc^2$* , Am. J. Phys. **58**(4), April 1990.
- J. Ron, *El origen y desarrollo de la relatividad*, Alianza Universidad, Madrid, 1983.
- V. Silvestrini, *Introdução à teoria da relatividade*, Ed. notícias, Lisboa, s/d.
- J. Stachel, R. Torretti, *Einstein's first derivation of mass-energy equivalence*, Am. J. Phys. **50**(8), Aug 1982.
- R. Stannard, *O tempo e o espaço do tio Alberto*, Ed. 70, Lisboa, 1991.
- THE PRINCIPLE OF RELATIVITY*, a collection of original papers on the special and general theory of relativity, Dover Publications, Inc, New York, s/d.

APÊNDICE IV

O CONCEITO DE MASSA

II - ANÁLISE DO CONCEITO

O Conceito de Massa. II. Análise do Conceito

(The concept of mass. II. Analysis of the concept)

Jorge António Valadares

Universidade Aberta, 1000 Lisboa, Portugal

Recebido para publicação em 20 de Janeiro de 1993; Aceito para publicação em 30 de Agosto de 1993

Resumo

Neste artigo defendemos a *abolição da massa relativista* ou massa dependente da velocidade, que consideramos uma “misconception” que a história da evolução das idéias relativistas, mais do que o próprio Einstein, ajudou a estabelecer. Uma partícula, para sofrer um dado aumento de velocidade num certo intervalo de tempo, exige uma força cada vez maior, quando a sua velocidade se aproxima da velocidade da luz. Este fato induziu a idéia de que a estrutura da partícula, a sua energia e a sua massa, foram afetadas, quando, na realidade, isso é uma consequência da dilatação temporal relativista. A *massa e a energia* de uma partícula são *grandezas diferentes* sendo a primeira a grandeza do quadrivetor momento-energia e a segunda uma componente, apenas, desse quadrivetor. A massa não varia de referencial de inércia para referencial de inércia e a energia varia. Partículas há que possuem energia mas não possuem massa. A massa de um sistema *equivale* à sua *energia em repouso*, isto é, à energia das suas partículas constituintes *medida no referencial próprio* (referencial em que o momento linear total é nulo), já que apenas quando o momento é nulo o quadrivetor momento-energia se reduz à componente energia. Uma parte, e só uma parte, desta energia em repouso equivale à soma das massas das partículas. Por conseguinte, *a massa de um sistema excede a soma das massas das suas partículas* numa quantidade igual à energia que essas partículas possuem no referencial próprio. Se a energia em repouso do sistema se mantém, mantém-se a massa. Se o sistema perde energia para o exterior, a massa diminui; se recebe energia do exterior a massa aumenta. Trata-se de variações concomitantes ou correlativas da massa e energia do sistema, e não de conversão de massa em energia ou de energia em massa.

Abstract

In this paper, we propose the *abolishment of the relativistic mass* or velocity dependent mass, which we consider a misconception established more by the evolution of the relativistic ideas than by Einstein himself. In order to get a certain speed increase in a given time interval, a particle requires an always increasing force when its speed nears the speed of light. This fact induced the idea that the structure of the particle, its energy and its mass, are affected when, in fact, this is a consequence of the relativistic time dilation. The *mass* and the *energy* of a particle are *different magnitudes*, in which the first is the magnitude of the momentum-energy quadrvector and the second is just a component of this quadrvector. The mass do not change from one inertial frame of reference to another whereas the energy do vary. There are particles that have energy but no mass. The *mass* of a system is *equivalent* to its *rest energy*, that is, the energy of its constituent particles as measured in *their own frame of reference* (frame of reference in which the total linear momentum is zero), since only when the momentum is zero the momentum-energy quadrvector reduces itself to the energy component. A part, and just a part, of this rest energy is equivalent to the sum of the masses of the particles. Consequently, *the mass of a system exceeds the sum of the masses of its particles* by an amount equal to the energy that these particles have in their own frame of reference. If the rest energy of the system is conserved, the mass is conserved. If the system loses energy to the environment, the mass decreases; if it receives energy from the environment, the mass increases. These are concomitant or correlative variations of the mass and of the energy of the system, not the conversion of mass into energy or energy into mass.

O significado de um conceito 3 construído por cada ser humano com base nas interligações que são feitas com outros conceitos já existentes na sua estrutura cognitiva. O fato de o mesmo significado ser compartilhado por muitos seres humanos significa apenas que são idênticas as associações que são feitas entre esse conceito e os outros, e não que esse significado está certo ou errado. Com outro tipo de interligações, ou através de uma nova definição das interligações já existentes, chegar-se-á a um significado diferente do conceito. O presente artigo pretende “negociar” (Novak e Gowin, 1991, p. 20) um significado do conceito de massa (com quem, de entre os seus leitores, quiser ou necessitar de o fazer), em que 3 abolida a ligação massa-velocidade e repensada a ligação massa-energia. Se esse significado for aceito, tornar-se-á transparente a necessidade de eliminar “misconceptions” como a de que “a massa se converte em energia e a energia em massa”.

II.1. Massa relativista, massa em repouso e massa própria de uma partícula

Uma das leis físicas mais importantes que se verificam no Universo 3 a lei da conservação do momento linear. Essa lei está intimamente relacionada com a existência de uma determinada simetria no espaço físico, a simetria no que se refere à translação nesse mesmo espaço. A validade dessa lei em todos os referenciais inerciais exige que o momento linear de uma partícula, definido na Mecânica newtoniana por $\vec{p} = m\vec{v}$, passe a ser definida, no contexto da teoria da relatividade restrita, por $\vec{p} = \gamma m\vec{v}$. Nesta definição relativista do momento linear, à clássica massa inercial da partícula, m , definida conceptualmente por Newton e operacionalmente por Euler (conforme vimos na primeira parte deste trabalho, e à velocidade da partícula, 3 acrescentado o fator adimensional de Lorentz.

$$\gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}$$

Este fator γ pode, em princípio, ser associado à massa ou à velocidade.

Se pretendermos manter a definição newtoniana de momento, teremos de integrar o fator na massa. Temos, então

$$\vec{p} = M\vec{v} \quad \text{com} \quad M = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

O coeficiente M , que cresce com a velocidade da partícula, e tende para infinito quando essa velocidade se aproxima da da luz, designa-se vulgarmente por *massa relativista* da partícula.

Particularizando para um referencial inercial ligado à partícula (vulgarmente designado por *referencial próprio*) e em que, portanto, a *partícula está em repouso* ($v = 0$), vem $M = m$. A massa m costuma-se, portanto, chamar, *massa em repouso* da partícula. Independentemente do novo significado que com Einstein esta massa adquiriu, e de que trataremos a seguir, ela acaba por ser igual à clássica massa de Euler, quantificando a inércia da partícula. Para a medirmos, basta aplicar uma força à partícula e determinar o quociente da força pela aceleração “enquanto o movimento for lento” (Einstein, p. 81).

Uma outra lei fundamental da natureza 3 a *lei da conservação da energia*. Para que esta lei seja válida para todas as velocidades possíveis, a energia de uma partícula terá de ser definida por

$$E = \gamma mc^2 = mc^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}$$

Desenvolvendo em série a potência do último membro e considerando desprezáveis as parcelas de segunda ordem em v/c e ordens superiores, vem

$$E = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

Estando a partícula em repouso ($v = 0$), vem

$$E_0 = mc^2$$

Esta equação traduz a equivalência massa-energia de Einstein, e permite-nos concluir que *a massa em repouso de uma partícula equivale* à sua energia em repouso. Como a velocidade da luz no vácuo, c , 3 uma constante universal, poderemos considerar sistemas de unidades em que a velocidade da luz 3 unidade fundamental, $c = 1$, resultando a energia em repouso da partícula e a sua massa em repouso como grandezas iguais. No SI, e em todos os sistemas em que $c \neq 1$, *a massa em repouso e a energia em repouso* são diferentes, mas *a sua diferença não 3 fundamental*, sendo

antes o resultado da existência de um fator de conversão de unidades diferente da unidade. A massa em repouso de uma partícula e a energia que ela contém podem considerar-se os dois aspectos, as duas manifestações de um atributo, uma mesma entidade referida à partícula, e que tem que ver com a sua natureza bem como com o nível energético interno em que ela se encontra. A essa entidade chama-se muitas vezes *massa-energia* da partícula. Tanto se pode exprimir em unidades de massa como de energia. Quando esse atributo varia, variam concomitantemente a massa em repouso e o conteúdo de energia da partícula. São variações paralelas ou correlativas das duas manifestações quantitativas do mesmo atributo e *não se trata de conversão de uma noutra*.

A massa em repouso de uma partícula é uma propriedade intrínseca da partícula, fundamentalmente equivalente à sua energia medida no referencial próprio. Para uma partícula material qualquer com estrutura, tem que ver com a sua natureza e com o nível energético interno em que se encontra. No caso de um átomo no estado fundamental, por exemplo, a massa em repouso equivale à energia que possui pelo fato de se encontrar nesse estado. Se o átomo receber energia e passar a um estado excitado, a sua massa em repouso aumenta, pois a energia contida no átomo é agora maior. A energia em repouso do átomo, quando ele está no seu estado fundamental ou de menor energia, costuma chamar-se *energia própria* e a massa que lhe corresponde segundo a equação de equivalência é a *massa própria*.

A massa própria de uma partícula material com estrutura corresponde, pois, a um caso particular da sua massa em repouso: equivale à energia do átomo, não só quando está em repouso, mas também quando se encontra no estado fundamental. Note-se, porém, que sendo a energia contida em qualquer corpo medida a menos de uma constante arbitrária, a sua massa própria, correspondente ao conteúdo de energia mínimo, também o será. Este fato retira validade prática ao conceito de massa própria, mas não lhe retira interesse teórico, mormente no domínio das partículas materiais. É a massa própria que verdadeiramente caracteriza uma partícula elementar, pois só ela tem que ver exclusivamente com a sua existência. A chamada massa relativista também tem que ver com o referencial em que a partícula é observada, e as outras massas em repouso, corresponden-

tes aos diversos níveis de excitação, também dependem da energia que foi fornecida à partícula.

II.2. A massa relativista é um conceito confuso, pelo que deve ser abolido

A associação que fizemos do fator de Lorentz à massa, e o conseqüente aparecimento da massa dependente da velocidade, ou massa relativista, ainda que historicamente tenha conduzido a estratégias simples para abordar alguns temas de relatividade, é atualmente posta em causa. (Adler, 1987, p. 739). Muitos livros clássicos têm vindo a abandonar o conceito de massa relativista por várias razões, algumas das quais passamos a apresentar.

Em primeiro lugar, porque ao alargar-se a expressão newtoniana do momento ao domínio relativista, escrevendo $\vec{p} = M\vec{v}$, pretende-se muitas vezes estender o significado físico da massa inercial clássica à massa relativista, considerando esta como uma propriedade característica da partícula que mede a sua inércia. É vulgar, por exemplo, ver-se desenvolver um raciocínio deste tipo: "é cada vez mais difícil aumentar-se a velocidade de uma partícula, quando a sua velocidade se aproxima da da luz no vácuo, porque a inércia da partícula, dada pela massa relativista, $M = m/\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ é cada vez maior, pelo que ela resiste cada vez mais à ação das forças. Este tipo de raciocínio é falacioso, como vamos ver.

Quando aplicamos uma força a uma partícula, e a sua velocidade se mantém relativamente pequena, esta acelera sempre na direção e sentido da força e de modo proporcional a esta. A sua velocidade apresenta, pois, uma taxa de variação que manifesta sempre as mesmas características: é proporcional à força e ocorre no sentido para onde a força aponta. Nestas condições é legítimo afirmarmos que existe uma propriedade, um atributo do corpo que mede a inércia. Essa propriedade é a *massa em repouso*, cujo valor coincide com o da *massa inercial*, definida operacionalmente por Euler com base na equação $m = F/a$ (quanto maior for m , menos acelera a partícula sob a ação de uma força).

Passar-se-á o mesmo quando a partícula atinge altas velocidades?

A lei fundamental da dinâmica $\vec{F} = d\vec{p}/dt$ mantém-se válida no domínio relativista desde que se adote a definição de momento $\vec{p} = \gamma m\vec{v}$.

Substituindo esta expressão do momento na equação da lei fundamental e efetuando a derivação, obtém-se a seguinte relação

$$\vec{a} = \frac{\vec{F} - (\vec{F} \cdot \vec{\beta}) \cdot \vec{\beta}}{\gamma m}$$

onde $\vec{a}$ representa a aceleração, dada por $\vec{a} = d\vec{v}/dt$, e $\vec{\beta} = \vec{v}/c$.

Esta expressão mostra que, em geral, a aceleração de uma partícula depende do ângulo que a força faz com a velocidade, e não tem a direcção e o sentido da força. A aceleração e a força são colineares apenas nos seguintes casos:

1º - Quando a força $\vec{F}$ é transversal, isto é, atua perpendicularmente à velocidade. Nesta situação particular, temos:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{\gamma m} \Rightarrow \gamma m = \frac{F}{a}$$

O produto γm é a *massa transversal* e tem uma equação de definição igual à da massa inercial de Euler. Tal como esta, poderá de fato medir a inércia, mas apenas nesta situação em que a força é transversal, e em que só há, portanto, alteração da direcção da velocidade.

2º - Quando a força $\vec{F}$ é *longitudinal*, ou seja quando atua na direcção da velocidade. Neste caso, temos:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{\gamma^3 m} \Rightarrow \gamma^3 m = \frac{F}{a}$$

Agora é o produto $\gamma^3 m$, a chamada massa longitudinal, que é igual ao quociente da força pela aceleração e que, portanto, mede a inércia, mas apenas nesta situação em que a velocidade só varia em módulo.

Tal como vimos na primeira parte deste trabalho, estas massas transversal e longitudinal foram pela primeira introduzidas na Física antes de Einstein, no quadro conceitual da Física clássica. Para tal, foi utilizado um modelo de elétron com estrutura. As propriedades decorrentes do modelo, e entre elas as dependências entre a massa e a velocidade, foram consideradas extensíveis a todos os outros corpos. No final do século passado, muitos físicos, tais como Abraham, Bucherer, Fermi, Kaufman, Langevin, von Laue, Lorentz, Planck, Poincaré, entre outros, envolveram-se apaixonadamente

no problema da massa transversal e longitudinal (Adler, 1987, p.741). Não admira, pois, que Einstein sentisse a necessidade de estabelecer, com base na TRR, as expressões dessas massas, mas pouca ou nenhuma importância lhes atribuiu. E, acima de tudo, não considerou no seu trabalho original a massa relativista, $M = m/\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \gamma m$ como uma medida da inércia da partícula. É fácil concluir por que motivo esta massa dependente da velocidade não se pode considerar uma propriedade da partícula capaz de medir a sua inércia.

Com efeito, para ser uma propriedade da partícula medidora da inércia, a massa deverá ser univocamente determinada, depender apenas da partícula e não de outras e medir a inércia em todas as condições. Ora, vimos que não há, afinal, uma só massa dependente da velocidade (isto é, no fundo há mais do que uma massa relativista...). Além disso, a chamada massa relativista, $M = \gamma m$, atrás referida só é o quociente da força pela aceleração quando a força atua transversalmente. Apenas nesse caso particular poderá servir como uma medida da inércia. No caso da força atuar longitudinalmente, já é outra a expressão da massa medidora da inércia.

Em suma: só há uma propriedade de uma partícula (dependente, portanto, apenas dela, e não do referencial ou do modo como a força atua) e *que pode medir a inércia* - ela é a *massa em repouso* da partícula e o seu valor coincide com o da sua massa newtoniana. (Alcaine, p.60, Adler, p.740).

O fato de se usar indevidamente (quanto a nós!) a massa relativista como uma medida da inércia é um motivo razoável para ela ser abolida. Mas vamos ver outros motivos.

Como sabemos, um dos dois grandes pilares em que a TRR assenta é o princípio da relatividade de Einstein: **as leis da Física são as mesmas em todos os referenciais de inércia**.

Este princípio impõe que as leis da Física sejam traduzidas por equações covariantes, isto é, que se transformam do mesmo modo ao passar de um referencial inercial para outro. Só assim as equações terão a mesma estrutura formal nos dois referenciais inerciais e, sendo válidas num, também o serão no outro. Ora, é um fato que a equação $\vec{p} = M\vec{v}$ não é covariante, mas já o é a equação que corresponde a esta no espaço-tempo a

quatro dimensões. Nessa equação, referente ao espaço-tempo de Minkowski, em lugar da massa relativista, M , aparece a massa em repouso, m , que é um duplo invariante de Lorentz: invariante no caso dos sistemas isolados, e invariante na passagem de um referencial inercial para outro.

Por outro lado, a massa relativista de uma partícula, M , dada por

$$M = \frac{E}{c^2}$$

acaba por ser fundamentalmente idêntica à sua energia total (pois é-lhe proporcional, sendo a constante de proporcionalidade universal). Porque não falar apenas na energia total da partícula e esquecer a massa relativista?

Finalmente, ainda podemos apresentar outro argumento. A massa relativista transporta consigo a conotação histórica que lhe foi atribuída pelos trabalhos de vários físicos anteriores a Einstein. Todos esses físicos procuravam ver na massa de uma partícula, quando a sua velocidade aumenta, uma variação produzida por uma alteração estrutural de qualquer tipo, uma modificação interna. Tem-se detectado, em muitas investigações educativas efetuadas na sala de aula, uma grande homogeneidade entre as concepções confusas e incorretas em que a história da ciência é fértil, e as concepções reveladas por muitos alunos e professores, independentemente do lugar, da escola e do meio sócio-econômico em que trabalham.

Ainda hoje muitos alunos e professores são induzidos a pensar que, quando um corpo passa de uma baixa velocidade até uma velocidade próxima da que a luz apresenta no vácuo, alguma alteração se produziu na sua estrutura que fez com que a sua inércia aumentasse.

Suponhamos, por exemplo, um elétron em movimento lento. Se lhe aplicarmos uma força de $9,10 \cdot 10^{-31}$ N, na direção e sentido do seu movimento, ele leva 1 segundo para sofrer um aumento da sua velocidade de 1,00 m/s. Se ele se mover com uma velocidade de 99,5% da da luz, já vai levar quase 10 segundos para sofrer o mesmo aumento de velocidade em idênticas condições. Será isto devido ao fato de a inércia do elétron ter aumentado 10 vezes? Não. O elétron é considerado hoje uma partícula sem estrutura, e não se aceita que a energia a ele fornecida, para o colocar àquela alta ve-

locidade, tenha provocado qualquer tipo de alterações internas capazes de afetar a sua massa inercial. O fato do intervalo de tempo necessário para se verificar o acréscimo de 1m/s na velocidade do elétron ter aumentado dez vezes é meramente cinemático, e consequência da relatividade do tempo. A medição do intervalo de tempo está a ser feita no referencial de laboratório onde o elétron se move a alta velocidade. O intervalo de tempo de 1 segundo continua a ser sempre o mesmo no referencial do elétron. Só que é observado dilatado no referencial de laboratório, como consequência da mudança de referencial (dilatação temporal relativista).

Em suma: Quando um corpo aumenta a sua velocidade, aparenta alterar a sua estrutura de modo a aumentar a inércia, isto é, resistir mais à ação das forças. E dizemos que aparenta porque, de fato, a mesma força continua sempre a produzir a mesma alteração de velocidade no mesmo intervalo de tempo próprio (intervalo de tempo medido no referencial próprio, ou referencial em que o corpo está em repouso). Só que, no referencial de laboratório, quanto maior é a velocidade, maior é o intervalo de tempo correspondente a um dado intervalo de tempo próprio e durante o qual se processa um determinado aumento de velocidade sob a ação da força atuante. Observa-se, pois, que a força tem de atuar cada vez durante mais tempo para produzir o mesmo aumento de velocidade, não porque a massa inercial aumentou, mas porque o intervalo de tempo aumentou. Trata-se, portanto, de uma consequência da dilatação temporal e não de uma alteração da natureza ou da estrutura do corpo.

II.3. A massa como propriedade dos corpos

Ao não considerarmos a chamada massa relativista e todas as massas dependentes da velocidade, ficamos apenas com a massa em repouso (a massa própria é, como vimos, um caso particular da massa em repouso). Torna-se então possível e até recomendável deixar cair o qualificativo "em repouso", até porque essa massa, determinada para cada corpo, acaba por ser igual à sua massa newtoniana. De agora em diante *falaremos apenas em massa* com o significado da massa em repouso, por considerarmos que, como medida da inércia, "massa só há uma, a massa em repouso e mais nenhuma".

Os conceitos de massa relativista e massa em repouso resultaram, como vimos, de se ter associado o

fator de Lorentz à massa newtoniana.

Mas, porque não associar o fator de Lorentz à velocidade, em vez de o ligar à massa? Não é um fato que este fator aparece na TRR através de considerações cinemáticas baseadas nos conceitos relativos de espaço e tempo e nos dois postulados da teoria? Não será mais legítima a associação do fator de Lorentz à velocidade, grandeza cinemática diretamente relacionada com o espaço e o tempo? Por tudo o que expusemos, entendemos que sim, e obtemos então para definição de momento

$$\vec{p} = \gamma m \frac{d\vec{r}}{dt} \Leftrightarrow \vec{p} = m \frac{d\vec{r}}{\frac{dt}{\gamma}} \Leftrightarrow \vec{p} = m \frac{d\vec{r}}{d\tau}$$

onde $d\tau$ é o intervalo de tempo próprio.

O momento é o produto da massa pela velocidade própria. Esta não é mais do que o quociente do deslocamento elementar no RL (referencial de laboratório) pelo tempo elementar próprio, portanto medido no referencial próprio.

A massa que aparece nesta expressão e nas demais expressões relativistas, ainda que tenha o mesmo valor que a massa newtoniana, adquiriu com Einstein um significado que não possuía na Física clássica. A massa de um corpo, para além de medir a inércia do corpo, passou a ser uma grandeza fundamentalmente equivalente ao seu conteúdo de energia. Toda a energia associada às moléculas e aos átomos, aos elétrons e aos nucleons contidos no corpo, contribui para a sua massa. Se essa energia for alterada, altera-se a massa do corpo e, com ela a sua inércia. Diremos mesmo que *a inércia de um corpo é uma propriedade da energia que ele contém*. (Baierlein, 1991, p. 174)

Sempre que um corpo livre é observado em movimento, a sua energia total é dada por $E = mc^2 + E_c$ e difere da sua massa. A massa do corpo continua a ser equivalente à energia nele contida, mas o corpo possui agora uma outra energia, a energia cinética inerente ao seu movimento global e que depende do referencial em que é observado esse movimento. Esta energia cinética exterior não contribui para a massa do corpo. A massa do corpo e a sua energia passam agora a ser grandezas absolutamente distintas (Taylor e Wheeler, 1966, p. 137). Com efeito, enquanto que a massa é um invariante, a energia já depende do referencial em que o corpo é observado. Além disso, a massa corresponde

à grandeza do quadrvetor momento-energia¹ enquanto que a energia é só uma componente desse quadrvetor.

Tendo em conta a expressão da energia total de uma partícula, $E = \gamma mc^2$ podemos obter a expressão da sua energia cinética:

$$E_c = (\gamma - 1)mc^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) mc^2$$

A energia cinética, E_c , torna-se infinitamente grande quando a velocidade v atinge a da luz, c . Tal como afirmou Einstein quando pela primeira vez estabeleceu a expressão anterior (Einstein, p.84), velocidades superiores à da luz no vácuo, c , não têm, pois, possibilidade de existir.

Dividindo as expressões do momento e da energia temos:

$$\frac{p}{E} = \frac{\gamma m v}{\gamma m c^2} = \frac{v}{c^2} \quad (1)$$

Elevemos ao quadrado a expressão da energia para obter

$$E^2(1 - v^2/c^2) = m^2 c^4$$

Substituindo v tirado da expressão (1) e simplificando, obtemos finalmente

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$$

Esta relação fundamental mostra que as componentes do quadrvetor momento-energia se relacionam de modo a dar uma expressão invariante. Tal expressão permite-nos definir a massa m de uma partícula por meio da seguinte equação de definição:

$$m = \sqrt{E^2 - p^2 c^2} / c^2$$

A massa definida por esta expressão - *massa invariante de Lorentz* - é precisamente a raiz quadrada do quadrvetor momento-energia ao quadrado, dividido por c , e possui as seguintes características:

1ª - coincide com a massa-energia (medida da inércia) que temos vindo a defender, pois temos no referencial em repouso

¹ Generalização do vetor momento do espaço euclídeo ao espaço-tempo de Minkowski, em que às três componentes do momento é acrescentada uma quarta componente que é a energia.

$$m = \sqrt{E_0^2 - 0c^2}/c^2 = E_0/c^2 = \text{massa em repouso}$$

2ª - Prevê massa nula para aquelas partículas que não têm massa em repouso, isto é, para as quais nem é legítimo falar em referencial em repouso (caso dos fótons, por exemplo), pois temos

$$m = \sqrt{(pc)^2 - p^2c^2}/c^2 = 0$$

3ª - É invariante para as equações de transformação de Lorentz;

4ª - É ela que aparece em equações covariantes traduzindo as leis mecânicas no espaço-tempo a quatro dimensões.

“Quando trabalham em Física relativista, os físicos das partículas usam apenas o termo massa” (Okun, 1989, p. 31). Muitos outros físicos também já só trabalham com um conceito de massa. Infelizmente no ensino ainda se verifica muitas vezes a utilização da massa relativista, e, o que é ainda pior, conotada com o conceito de inércia. Acreditamos que o ensino da Física ganhará em clareza se usarmos a *espada de Ockam*² e nos cingirmos a uma só massa. Se pretendermos defini-la conceitualmente, consideramo-la como uma grandeza equivalente à energia contida no corpo, de que depende a sua inércia. Se pretendermos defini-la operacionalmente, recorreremos à expressão $m = \sqrt{E^2 - p^2c^2}/c^2$ onde E é a energia do corpo e p a sua quantidade de movimento medidas no mesmo referencial. Dado o fato de esta expressão ser um invariante de Lorentz, a massa assim definida acaba por ser independente do referencial e uma autêntica propriedade intrínseca da partícula.

Baierlein é de opinião de que *se não podemos substituir a palavra massa pela palavra inércia na frase de um autor, então este está a usar de modo confuso a palavra massa e a afirmação é profundamente suspeita*. (1991, p. 170). Ora tal não sucede, se usarmos sempre a palavra massa, aplicada a um corpo, com um significado conotado com o da energia em repouso do corpo, através da relação $E_0 = mc^2$. É esta a relação que traduz verdadeiramente a famosa equivalência massa-energia de Einstein. (Okun, 1989, p. 31).

²O filósofo e teólogo do séc. XIII, Guilherme de Ockam, era adepto de que *as entidades não devem ser multiplicadas sem necessidade*, asserção esta que ficou conhecida como “a espada de Occam”.

II.4. Algumas “misconceptions” relacionadas com a massa

Numa transformação que ocorre num sistema isolado o conteúdo de energia deste mantém-se e, portanto, também se mantém a massa do sistema. Temos assim que a massa nos sistemas isolados é duplamente invariante: não varia ao longo do tempo, e também não varia de RI para RI. Daí o fato de Einstein ter afirmado que o princípio da conservação da massa se identifica com o da conservação da energia.

Vamos considerar uma situação concreta, uma reação de desmaterialização ocorrida num sistema isolado. Imaginemos um elétron e um pósitron movendo-se tão lentamente que se pode desprezar a energia cinética e o momento do sistema por eles formado. Tem-se, então para o *sistema elétron-pósitron*, ámbos com a mesma massa m ,

$$\begin{aligned}\vec{p}_i &= 0 \\ E_i &= mc^2 + mc^2 = 2mc^2\end{aligned}$$

Vamos agora supor que em determinado momento o elétron e o pósitron ficam a uma distância tal que são atraídos um para o outro acabando por colidir e originar dois fótons:

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$$

É correto falar-se em conversão de matéria e antimatéria em radiação, porque se trata de fato da transformação de “coisas” (o elétron e o pósitron) que existem com determinadas propriedades numa outra “coisa” (a radiação) que existe com outras propriedades. Mas já não achamos correto falar-se de conversão de matéria e antimatéria em energia. Como é que entidades tangíveis (o elétron e o pósitron) se podem converter num atributo ou propriedade, um “construto” que caracteriza as “coisas” (a energia)? Será legítimo falar-se na conversão de água do mar em densidade?

Mas, poder-se-á perguntar: sendo a massa e a energia duas propriedades de um sistema, já será correta a afirmação vulgar de que “na reação de desmaterialização do sistema elétron-pósitron há conversão de massa em energia”?

Vamos admitir a validade das leis da conservação da energia e da conservação do momento. A energia

total dos dois fótons é igual à energia total do elétron e pósitron:

$$E_f = 2h\nu = 2mc^2$$

Pela lei da conservação do momento temos:

$$\vec{p}_f = \vec{p}_i = \vec{0}$$

Se a energia foi sempre a mesma, como pode ter havido uma conversão de “algo” em energia? Mas ... e a massa do pósitron e do elétron? Afinal o elétron e o pósitron têm massa e os fótons, considerados como partículas isoladas, não têm massa mas têm energia. Não poderemos então falar numa conversão de massa (do elétron e do pósitron) em energia (dos fótons)? Em nossa opinião, não! Estamos perante, não um fóton, mas um sistema de dois fótons com energia total não nula e momento total nulo. Então tal sistema tem um conteúdo de energia no referencial em que o momento total é nulo, e portanto onde o respectivo CM (centro de massa) está em repouso. Assim sendo, tal sistema tem um conteúdo de energia em repouso, logo tem massa. (Alcain, 1989, p. 61; Baierlein, 1991, p. 174)

A equação da definição de massa permite-nos calcular a massa do sistema dos fótons que, como vimos, tem momento nulo:

$$\sqrt{E_f^2 - p_f^2 c^2} / c^2 = \sqrt{(2mc^2)^2 - 0} / c^2 = 2m$$

Vemos assim que a massa do sistema de fótons não é nula mas é igual a $2m$, ou seja igual à massa antes da ocorrência do processo. Não houve, pois, conversão de massa em energia. Houve, sim, conservação da massa e, portanto, da energia do sistema. A manifestação da energia mudou: deixou de estar associada ao elétron e pósitron na forma de energia em repouso (e de energia cinética que desprezamos apenas por simplicidade); passou a manifestar-se apenas na forma cinética, após a produção dos fótons. Mas o conteúdo de energia e a massa e, portanto, a inércia do sistema não mudaram: Mas... sendo a massa do fóton isolado nula, como pode ser não nula a massa do conjunto dos dois fótons? A massa total do sistema de fótons não é a soma das massas dos fótons?! Tal como muito bem realçam Taylor e Wheeler (1992, p.247), *o que é aditivo não é a massa, mas, sim, a energia e o momento*. Não só a energia

em repouso, equivalente à massa, de cada partícula de um sistema, contribui para o conteúdo energético do sistema, logo para a massa deste. Toda a energia (cinética ou potencial) das partículas do sistema, como já afirmamos, contribui para a massa do sistema. Se, por exemplo, tivermos um sistema de n partículas livres, a massa do sistema excederá a soma das massas das suas partículas numa quantidade equivalente à soma das energias cinéticas dessas partículas (quando medidas no referencial próprio, isto é, onde o momento total é nulo). No caso dos dois fótons, a soma das massas das duas partículas é zero, mas a massa do sistema dos fótons não é nula, porque eles têm energia cinética que contribui para a energia em repouso do sistema³. E, afinal, não é este caso o único em que o todo é algo mais que a soma das partes...

Bibliografia

- C. Adler, *Does mass really depend on velocity, dad?*, Am. J. Phys. **55** (8), August 1987.
- G. Alcaine, *Sobre masa y energía*, Revista Española de Física, **3**, 1, 1989.
- R. Baierlein, *Teaching $E = mc^2$* , *The Physics Teacher*, March 1991.
- A. Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, Alianza Editorial, Madrid, 1984.
- A. Einstein, *Notas autobiográficas*, Alianza Editorial, Madrid, 1984.
- A. Einstein, *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento*, in *TEXTOS FUNDAMENTAIS DA FÍSICA MODERNA, I volume - O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE*, Fund. Calouste Gulbenkian, 1972.
- A. Einstein, *A inércia de um corpo será dependente do seu conteúdo energético?*, in *TEXTOS FUNDAMENTAIS DA FÍSICA MODERNA, I volume - O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE*, Fund. Calouste Gulbenkian, 1972.

³É legítimo falarmos em energia em repouso e, portanto, em massa do sistema dos dois fótons, porque existe para esse sistema um referencial próprio, no qual o seu momento total é nulo (ainda que o momento de cada fóton não o seja).

- M. Jammer, *Concepts of mass*, Harvard University Press, Cambridge-Massachusetts, 1961.
- J. Novak, D. Gowin, *Learning how to learn*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
- L. Okun, *The concept of mass*, Physics Today, June 1989.
- A. Pais, *Subtil é o Senhor*, Edit. Gradiva, Lisboa, 1993.
- J. Ron, *El origen y desarrollo de la relatividad*, Alianza Universidad, Madrid, 1983.
- J. Stachel, R. Torretti, *Einstein's first derivation of mass-energy equivalence*, Am. J. Phys. **50** (8), Aug 1982.
- E. Taylor, J. Wheeler, *Spacetime physics, introduction to special relativity*, WHFreeman & Company Lim., 1992.

APÊNDICE V

A ENERGIA

A Energia

JORGE VALADARES*

Este é o primeiro de dois artigos dedicados ao tema energia. Nele são passadas em revista as concepções alternativas que têm sido reveladas acerca desse tema, e é feito um percurso histórico que procura mostrar uma certa homogeneidade entre as dificuldades ocorridas na evolução do conhecimento dessa grandeza e as sentidas pelos alunos na sua aprendizagem.

1. CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS SOBRE A ENERGIA

Num questionário desenvolvido numa turma de 20 dos melhores alunos do 8º ano de escolaridade de uma escola de Lisboa, foi-lhes pedido que dissessem o que pensam sobre o que é a energia, e que usassem a palavra energia em frases que considerassem correctas. Eis algumas das respostas mais significativas:

- “Energia é uma força natural e é também um facto indispensável à vida.”
“Os alimentos são energia.” [João Ricardo]

- “Energia é uma força, um poder, que permite aos seres terem movimento e vida e pode ser transmitida.”
“Algumas reacções físicas e químicas só são possíveis devido à energia.” [David José]

- “Energia é uma força natural pela qual todos os seres vivos conseguem sobreviver.” [Filipe Miguel]

- “Energia é uma força que existe em todos os corpos do universo, que os transforma, que os cria, que os mata. É de origem desconhecida.” [Pedro Manuel]

- “A energia é uma força que serve para accionar diversos mecanismos.”
“A electricidade gera energia e a energia gera movimento.” [João Filipe]

- “Energia é uma espécie de força da qual depende todo o universo.”
“Os combustíveis são uma forma de energia.” [João Nuno]

- “Sem energia não havia movimento.”

- “Energia pode ser um combustível.” [Bruno Henrique]

- “A energia é o resultado de reacções químicas naturais ou provocadas artificialmente.”

- “O Sol fornece energia térmica e energia luminosa.”

- “Pode-se e deve-se poupar energia.” [Vitor Manuel]

- “A energia é uma fonte química que sem ela nada podia acontecer.”

- “A energia come-se!” [Luis António]

- “Os alimentos são energia.” [João Ricardo]

- “Os alimentos que comemos são feitos de energia. Senão não crescíamos e não nos reproduzíamos.” [Mário José]

- “A energia é expressamente necessária para o nosso dia a dia.” [Paulo Jorge]

- “Energia é um conjunto de átomos que actuam no globo terrestre.” [Nino João]

- “Energia é um «membro» constituinte do universo que é produzido por choques de átomos.” [Pedro Miguel]

As ideias sobre a energia contidas nesta série de depoimentos não são inéditas. Elas são compartilhadas por muitos alunos da mesma idade nas outras escolas do mundo. Já há cerca de 10 anos que tais concepções têm vindo a ser detectadas em vários países, e os problemas que levantam aos professores de ciências físicas têm vindo a ser debatidos desde que a prestigiada revista *European Journal of Science Education* (actual *International Journal of Science Education*) publicou uma série de artigos famosos sobre esse tema (Sexl 1981, Duit 1981, Warren 1982, Solomon 1983). Em 1983, Watts fez um apanhado das principais concepções dos estudantes sobre a energia, tendo-as repartido por 7 referenciais alternativos e,

de então para cá, muitas investigações têm sido levadas a cabo, nos outros países (Duit, 1984, Bliss e Ogborn, 1985, Gilbert and Pope, 1986, Trumper, 1990, Favieres et al., 1991, etc) e no nosso (Cachapuz e Martins, 1987, Valente e Pereira, 1990, etc).

Uma das concepções mais vulgares e persistentes é a *ideia de energia como uma força*. Ela foi detectada a partir dos trabalhos pioneiros de Duit na Alemanha (1981), Watts e Gilbert na Inglaterra (1983) e Brook e Driver novamente neste mesmo país (1984). Esta ideia está bem patente nas afirmações dos primeiros 6 alunos, atrás transcritas. Importa, porém, notar que a palavra força não tem o mesmo significado para todos esses alunos. O João Filipe aplica a palavra força com um significado muito mais físico do que os outros. Estes aplicam a palavra força num sentido mais metafísico, mesmo místico. Este sentido metafísico, que como veremos encontra o seu paralelismo na história da ciência, não tem sido destacado, tanto quanto sabemos, na literatura científica da especialidade, mas cremos que ele poderá constituir um visão comum em alguns países.

Observemos que a energia é, por vários alunos, associada aos objectos animados, particularmente ao homem. Esta *associação energia-objectos animados*, bem como a *visão antropomórfica da energia*, foram detectadas em vários países, começando por Stead (1980) na Nova Zelândia e Black e Solomon (1983) em Inglaterra.

A ideia de *energia como causa do movimento*, que está patente nas afirmações do João Filipe e do Bruno Henrique, também já foi identificada em diversos países a partir do trabalho de Stead (1980) com crianças neo-zelandesas. Os alunos não têm a ideia física de que um corpo se poderia mover sem necessidade de receber energia, caso não actuassem forças dissipativas, pois estas actuam sempre em todos os fenómenos que os alunos observam diariamente. Essa ideia física é já muito elaborada, e exige tempo e boas situações de aprendizagem para ser convenientemente assimilada.

A ideia de *energia como combustí-*

vel, que transparece nas afirmações do João Nuno e Bruno Henrique, também já foi detectada em vários países: Stead (1980) na Nova-Zelândia, Duit (1981) na Alemanha, Watts (1983) em Inglaterra, etc. Stead chamou logo a atenção para o efeito indutor de expressões como *crise de energia* ou *poupança de energia* pois, na realidade, levam os alunos a pensar em energia como combustível, já que a crise é, de facto, de combustíveis, e o que se deve tentar poupar são os combustíveis tradicionais não renováveis a curto e a médio prazo. A energia conserva-se, mantém-se quantitativamente invariável no universo, e, portanto, não faz sentido poupar uma «coisa» que não varia.

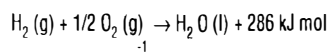
Uma outra concepção alternativa dos alunos, que começou a ser identificada com os trabalhos de Duit (1981) e Watts (1983), é a de que *a energia é um fluido*. O facto de os alunos verem explorar a energia do vento, dos caudais de água, da corrente eléctrica que eles «vêm» como um fluido, levam-nos à «substantificação» da energia, confundindo a energia com a própria água, com o ar ou com a corrente eléctrica.

Esta «substantificação» está patente em associações do tipo *energia-alimento ou componente do alimento* (expressas pelo Luis Antônio, João Ricardo e Mário José), *energia-combustível e energia-mecanismo*.

A concepção de *energia como um reagente ou produto de uma reacção* está evidente em algumas das afirmações dos alunos, sendo uma das concepções alternativas detectadas em diversos países (Martins, 1991). O facto de muitas reacções, para se desencadearem, exigirem um pequeno fornecimento de energia (energia de activação) para levar os reagentes à forma de complexo activado, leva os alunos a pensar que a energia é uma espécie de reagente. Para muitos deles, a chama que desencadeia a combustão do gás butano é um reagente em pé de igualdade com o butano e o oxigénio. Nas reacções exoenergéticas, a energia libertada afigura-se aos alunos como um produto que resultou da reacção por qualquer mecanismo idêntico ao que originou os restantes produtos (veja-se a afirmação do Pedro Miguel). Não é, porém, muito vulgar, a ideia de energia constituída por átomos (tal como afirma o Nino João). E muito menos é uma ideia intuitiva, pelo que deve resultar de uma elaboração baseada numa extrapolação do modelo atómico

que estes alunos já utilizaram na escola. É um dos riscos do uso de modelos, do estudo da «ciência do invisível», em fase prematura.

A concepção de energia como reagente ou produto sai reforçada quando os professores adoptam uma maneira incorrecta de exprimir equações termo-químicas, por ex.:



As afirmações em que *a energia surge como uma causa das «coisas» sucederem*, «the go of things» (Ogborn, 1986, p.30), e/ou *como uma causa das mudanças que ocorrem* (Ogborn, 1990, p.81) têm raízes profundas na história da ciência e no pensamento popular. Essa ideia causal, tão vulgar, é transmitida à escola, e nesta reforçada através do desenvolvimento cognitivo que se vai processando. Ela transparece em frases do tipo «isto sucede assim *porque* isto ou aquilo tem energia», por ex., «o Sol ilumina-nos porque tem energia». A ideia de que *a energia é necessária para as coisas acontecerem* está patente na afirmação do Paulo Jorge, atrás transcrita. Estas ideias constituem um claro desrespeito pela lei termodinâmica do crescimento da entropia, que o mesmo é dizer, pela lei que determina como evoluem espontaneamente os sistemas. Além disso, deturpam claramente o âmbito da física, ciência do «como» e não dos «porquês», cujas leis «não determinam o comportamento dos corpos mas, apenas, identificam os limites desse comportamento» (Gailunas, 1988, p.588).

A concepção de que *os fenómenos ocorrem espontaneamente num sistema no sentido em que a respectiva energia diminui* é um erro histórico que só a ciência termodinâmica ajudou a resolver. A grande maioria dos alunos e muitos professores acreditam que, por exemplo, um regato desce a montanha porque, desse modo, a energia diminui. Associam incorrectamente estes fenómenos a outros, do domínio estrito da mecânica, em que a estabilidade de um sistema aumenta com a diminuição da energia potencial (o caso de um pêndulo, por exemplo).

As concepções alternativas que se têm detectado sobre os mais variados temas de Física têm-se revelado muito resistentes à mudança. As que atrás referimos acerca da energia não fogem à

regra. Tivemos oportunidade de registar muitas dessas concepções em alunos da melhor turma do 11^a ano de escolaridade da escola a que atrás nos referimos, através das respostas ao mesmo questionário que foi aplicado aos seus colegas mais novos do 8^o ano, conforme se pode ver através da pequena amostra que se segue:

- «A energia pode ser considerada um fluido invisível que permanece constante há milhões de anos e do qual todos nós dependemos.» [Guilherme Nuno]

- «A energia é algo que faz as máquinas e seres funcionarem.» [Sérgio Neves]

- «A energia é uma força que faz mover o mundo e pela qual o mundo se desenvolve...» [Rui Miguel]

As afirmações acerca da entidade energia, e particularmente sobre a entidade calor, revelam-se muitas vezes confusas ou mesmo inaceitáveis também a nível dos professores, sendo suficiente, para não nos alongarmos, referir determinadas ideias gerais incorrectas que servem como referenciais alternativos dentro dos quais as afirmações que vão aparecendo se enquadram. Essas ideias gerais são ¹:

- *a energia como causa dos acontecimentos e da mudança;*

- *a energia como um produto resultante de determinados processos;*

- *o calor como sinónimo de energia interna, como energia cinética das partículas de um corpo, ou, em geral, como uma quantidade contida num corpo;*

- *o calor como energia interna transferida;*

- *o calor como energia que aquece os corpos e, particularmente, como sinónimo de trabalho dissipado e de luz.*

As afirmações, por exemplo, de que «uma lâmpada ilumina porque tem energia», ou de que «uma bola se move porque tem energia cinética» enquadram-se no primeiro dos referenciais anteriores. Tal como veremos na próxima secção, este tipo de afirmações tem profundas raízes históricas que se repercutiram na linguagem escolar. Afirmações como essas acabam por não ter em conta a segunda lei da Termo-dinâmica e o papel da entropia na determinação do

sentido em que evoluem os fenômenos. Além disso, e como já dissemos, assentam num pressuposto epistemologicamente incorrecto no que respeita às ciências da natureza. As leis físicas e, em particular, as leis relacionadas com a energia, não determinam o comportamento dos materiais mas apenas os limites desse comportamento. Acreditamos hoje que um acontecimento não poderá desenrolar-se quando dele resultar alteração da energia total ou diminuição da entropia geral do universo, mas não sabemos porque ocorre esse acontecimento e não outros cientificamente possíveis e igualmente prováveis. A Física e a Química, bem como as demais ciências da natureza, são, ao fim e ao cabo, «ciências do *como* e do *quê*» e não do *porquê* e do *para quê*.² Estes integram-se no reino da Filosofia.

As afirmações, por exemplo, de que “a energia do ser humano resulta do metabolismo” ou de que “a energia no fogão é um produto da combustão do gás” enquadram-se no segundo dos referenciais anteriores. Em qualquer processo físico ou químico que, como sabemos, ocorre com materiais, só podem resultar como produtos outros materiais. A energia não é, ao contrário do que historicamente se pensou, um material. A energia pode, no final de um processo, vir a manifestar-se de um modo diferente, mas isso não significa que ela tenha sido o fruto ou produto do processo. Ela acompanhou o processo, esteve sempre invariavelmente presente.

Os produtos duma transformação química ou de uma série qualquer de transformações, por mais complexa que seja, serão sempre e nada mais, produtos químicos.

Todas as afirmações em que se associa calor ao conteúdo energético de uma substância, tais como “calor é a energia total das partículas de um corpo”, “a energia provém do calor da chama”, e tantas outras usadas em várias áreas como a bioquímica, enquadram-se no terceiro referencial. A este respeito limitamo-nos a lembrar que o calor (tal como o trabalho) não é uma variável de estado e, em sintonia, a citar a seguinte afirmação de Zemansky num trabalho extremamente claro acerca do calor e que recomendamos a quem o não conhece (1970, p. 297): “calor e trabalho são métodos de transferir energia e, quando todo o fluxo de energia cessa, as palavras calor e trabalho não mais

têm qualquer utilidade ou significado”.

Pela mesma razão, afirmações vulgares tais como “calor é uma medida da energia térmica de um corpo”, “calor é a energia cinética das partículas materiais”, etc., são afirmações inaceitáveis, ainda que muitos dos grandes cientistas do século passado, e mesmo do nosso século, as pudessem subscrever.

Uma definição de calor que aparece muitas vezes é a seguinte: “calor é a energia interna que se transfere de um corpo para outro em resultado da existência de uma diferença de temperatura entre eles.” Independentemente do facto de não estar salvaguardada nesta definição a possibilidade de haver também realização de trabalho nas transferências de energia entre corpos a temperaturas diferentes, é (quanto a nós) pouco correcto falar-se em transferência de energia interna de um corpo para outro. A energia interna é uma propriedade de um sistema que varia quando ele troca energia com o exterior. Se, por exemplo, o sistema cede calor, perde energia e, como tal, a sua energia interna diminui. Podemos dizer que ocorreu transferência de energia através da fronteira, será porventura correcto classificá-la de um ponto de vista microscópico como energia cinética, mas não como energia interna, uma função de estado que, tal como a temperatura, só se define para cada sistema em cada estado. Só por abuso de linguagem se poderá falar, por exemplo, em transferência de entropia, assim como também não devemos dizer que se transferiu energia potencial quando, por exemplo, um corpo cai para a Terra, mas tão só, que ela diminuiu.

Alguns destes problemas de linguagem poderão parecer bizantinos para o cientista que tem outro tipo de preocupações. Porém, no ensino, a linguagem deverá ser muito cuidada pois a origem de muitas ideias confusas dos alunos está, muitas vezes, na linguagem menos correcta que é usada. A este respeito gostamos de citar a seguinte afirmação de Russel e Munley (1989, p. 112), a qual merecia, só por si, uma profunda reflexão didáctica: “a linguagem não só descreve o nosso mundo como substancialmente o cria”.

Na linguagem vulgar está muito enraizada a associação entre as palavras *aquecimento* e *calor*³. Os alunos têm, pois, tendência a conotar mentalmente os conceitos de calor e energia que aquece os corpos. As estratégias de

ensino, bem como a linguagem dos livros, muitas vezes não vinculam de modo claro o facto de um corpo ser aquecido por qualquer processo que aumente a sua energia interna, seja ele calor, trabalho ou radiação luminosa. Reforçam mesmo concepções incorrectas como a de que a luz (principalmente a radiação solar) é calor, ou a de que o trabalho dissipado (por exemplo por efeito Joule) é calor. É o caso da seguinte afirmação, transcrita de um livro de ciências da natureza: “todo o calor que aquece a Terra provém praticamente do Sol”⁴. Estas confusões também têm, como veremos, raízes históricas.

2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS CONCEPÇÕES RELACIONADAS COM A ENERGIA

Vários investigadores em ciências da educação têm perfilhado a tese piagetiana de que existe algum isomorfismo entre o modo como os estudantes vão construindo as suas concepções acerca do mundo e o modo como essas concepções evoluíram ao longo dos tempos. Quer no percurso conceptual por que um aluno vai passando, quer na sequência histórica das ideias, as concepções reinantes são fundamentais na construção das suas «herdeiras». Assim, de acordo com as estratégias construtivistas, temos de partir das concepções que os alunos possuem acerca de um conceito, muitas vezes distantes das ideias cientificamente aceites acerca do mesmo, para que eles possam vir a atingir estas concepções cientificamente aceites.

O conhecimento do modo como os conceitos evoluíram é importante para nos *ajudar a ajudar* os alunos na tarefa de construção das concepções correctas, e para que haja maior tolerância e uma atitude mais construtiva em relação às ideias incorrectas que se vão manifestando. Trata-se, no fundo, de uma nova posição face ao erro, que está de acordo com a moderna epistemologia. Vamos, pois, debruçar-nos um pouco sobre a evolução das ideias relacionadas com a energia.

A palavra *energia* tem uma etimologia grega: *en* (em, dentro) + *ergon* (acção, actividade). Para Aristóteles, este termo estava associada ao «acto», no sentido de um princípio subjacente à existência dos seres e à sua evolução. Ora, na sua *Metafísica*, vol IX, Aristóteles contrapõe a palavra «acto» à palavra

«potência», traduzindo um princípio segundo o qual um ente poderá vir a existir, um determinado fenómeno poderá vir a desencadear-se (Cresson, 1988, p.59, Locqueneux, 1989, p. 21). Julgamos, portanto, poder afirmar que a palavra energia tinha, naquele tempo, uma *clara e exclusiva conotação cinética*, que aliás transparece do próprio significado etimológico, e estava longe da cogitação dos gregos a possibilidade (hoje aceite) de algo possuir energia, mesmo sem estar envolvido em qualquer actividade.

Ao percorrermos a história da evolução das ideias científicas podemos vislumbrar algumas linhas que conduziram à compreensão actual do conceito de energia. Uma dessas linhas é a que, iniciando-se com uma *confusão sistemática entre os conceitos actuais de força e energia* no tempo da escolástica, passa pelo importante conceito de força viva (*vis viva*) e pelo comportamento desta nas colisões.

O ímpeto, a força viva e as raízes de algumas das concepções incorrectas acerca da energia

Nos séculos XIII e XIV, alguns filósofos (João Filipónio, Guilherme de Ockham, João Buridan, etc) opuseram-se à explicação aristotélica do movimento de um projectil com base numa causa exterior. Segundo eles, quando um corpo é posto em movimento, é-lhe comunicada "uma certa potência", a que chamaram *ímpeto*, e que funciona como uma causa interior do movimento. Trata-se pois de uma grandeza inerente ao próprio corpo, que justifica o facto de ele se mover para além do acto que originou o seu movimento. Assim, segundo afirmava João Buridan, "a causa motriz (a mão) imprime ao móvel um impulso ou ímpeto que, por sua vez, actua como causa, mantendo o projectil em movimento" (Cordon e Martinez, 1985, vol 1, p. 143). Uma bala, por exemplo, ao ser disparada por um

canhão, transporta consigo o ímpeto comunicado pelo canhão. Esse ímpeto vai diminuindo e, quando se esgota, a bala cai verticalmente segundo o movimento natural aristotélico.

Esta ideia de uma *causa interior*, uma "força movente" capaz de explicar o movimento dos corpos manteve-se até aos nossos dias. Podemos, pois, afirmar que os adeptos do ímpeto, "confundindo de certa maneira a energia comunicada à pedra com o ímpeto" (Enciclopédia Verbo, 7.º vol.; p.533), e considerando este como uma causa do movimento, acabaram por estar na base da ideia incorrecta de que a energia de um corpo (mais ou menos confundida com força) é a causa do movimento. Ao longo da evolução histórica, essa concepção manteve-se e influenciou a linguagem do dia a dia (ainda hoje são vulgares frases do tipo *o berlinde não traz força suficiente para chegar aqui*). Ora todos sabemos como essa linguagem comum, com toda a sua inércia, acaba por influenciar as ideias que os alunos trazem para a escola.

Desde o século XVI que a palavra *energia* era também usada em ciência para traduzir força muscular, vigor, capacidade de agir, e esse *significado antropocêntrico* também se manteve até aos nossos dias na linguagem vulgar, estando na base de muitas afirmações incorrectas produzidas pelos alunos na escola acerca da energia, algumas das quais vimos na secção anterior.

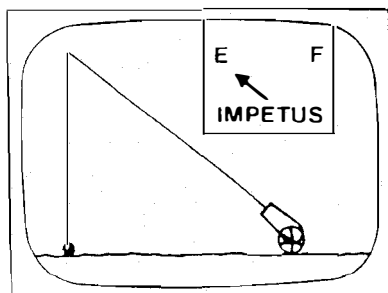
Se a manutenção do movimento por um corpo sempre preocupou muitos pensadores ao longo da história e está na base por exemplo da referida teoria do ímpeto, a transmissão do movimento de um corpo a outro também preocupou os cientistas, principalmente a partir do século XVII. É então que surge o falso problema de medir o efeito de uns corpos sobre os outros com que interactuam, e tentar quantificar o movimento de um corpo através de uma grandeza unívoca. A experiência mostrava que essa grandeza deveria ser dependente da massa e da velocidade, mas a forma dessa dependência dividiu a comunidade dos cientistas em duas correntes: os que defendiam o ponto de vista de Descartes, e os seguidores da ideia de Leibniz (Locqueneux, 1989, p. 64).

Descartes, ao estudar indistintamente os choques elásticos e os inelásticos,

concluiu que a grandeza que desempenha um papel fundamental nos mesmos é o produto da massa pela velocidade, grandeza que actualmente designamos por *quantidade de movimento ou momento linear*, mv . Foi Descartes quem apresentou, em 1644, o primeiro enunciado do *princípio de conservação da quantidade de movimento*, ainda que precedido de erros no modo de analisar determinados tipos de choques, e com uma noção incorrecta de massa, que confundia com o peso (note-se que esta confusão, apesar dos esforços notáveis de Euler, Lagrange e Gauss nos séculos XVIII e XIX, persistiu na linguagem científica⁵, e ainda persiste na linguagem vulgar dos nossos dias, estando patente em muitos dos nossos alunos, mesmo após alguns anos de estudo).

Pelo contrário, Leibniz considerava que a mais importante «medida do movimento» é o produto da massa pelo quadrado da velocidade, a que chamava *força viva* (*vis viva*), mv^2 , designação que opunha à de *força morta*. Tratava-se de uma espécie de "força movente" dos corpos (na linha do ímpeto). Referindo-se a ela e aos cartesianos, Leibniz escreve em 1683, no seu *Discurso da Metafísica*, o seguinte: "É que o senhor Descartes e muitos hábeis matemáticos acreditaram que a quantidade de movimento, isto é, o produto da velocidade pela massa do móvel, é exactamente a força movente....." E um pouco mais à frente: "Pois bem, é muito razoável que a mesma força se conserve sempre no universo... Eles acreditaram que o que se pode dizer da força também se podia dizer da quantidade de movimento. Mas, para mostrar a diferença, vou supor que um corpo que cai de uma certa altura adquire a força suficiente para voltar ao ponto de partida..." (Schurmann, vol. 1, p. 258). E, de facto, Leibniz compara os movimentos de queda de alturas diferentes de dois corpos de pesos (massas) diferentes. As colisões elásticas cá em baixo e os consequentes movimentos ascensionais, e, tirando partido da relação galileana das velocidades dos corpos, tenta mostrar que a referida "força movente" se ajusta à força viva e não à quantidade de movimento.

Foi com base nos trabalhos de Galileu, Descartes e Huyghens que Leibniz introduziu o conceito de *força viva* e concebeu as suas ideias acerca das colisões. Estas ideias, por sua vez, viriam a inspirar as investigações de J. Bernoulli, D.



Bernoulli, Euler e Lagrange conducentes à consolidação do *princípio de conservação da força viva*. Este, no século passado, redundaria no *princípio da conservação da energia cinética*, quando Kelvin introduziu a designação energia cinética para substituir a de força viva. Leibniz considerava importante o facto de a força viva se conservar em determinados choques (os elásticos) e não se conservar noutros (os inelásticos).

Ora, de facto, esta diferença veio a revelar-se decisiva para o estabelecimento da lei da conservação da energia, base da compreensão do conceito de energia. Se, nas colisões inelásticas, a «contabilidade» da força viva apresentava um «défice», era natural que os pensadores se interrogassem sobre o destino da força viva desaparecida. O próprio Leibniz, pelo menos na sua fase mecanicista (posteriormente abandonada), acreditava que essa força viva desaparecida era transformada em movimentos dos constituintes materiais. Aqui surge uma fonte que, se tivesse sido bem explorada, poderia ter conduzido mais rapidamente ao triunfo da ideia de calor-movimento sobre a sua rival, a ideia de calor substância.

Se, por um lado, Leibniz pode ser considerado um precursor da lei da conservação da energia, por outro lado as suas ideias metafísicas acerca da constituição dos corpos (a *monadologia*), e a sua ideia de um «ímpeto» (*conatus*) interno como causa do movimento, em nada contribuíram para a clarificação das concepções acerca dos conceitos físicos fundamentais, como são os de força e energia. As *mónadas* de Leibniz eram pontos físicos, sem extensão, que esse filósofo acreditava constituírem a matéria, mas eram simultaneamente *centros de energia ou de acção*, o que lhes conferia um significado anímico e causal. Com Leibniz, os conceitos de força e de energia não só se mantiveram confusamente misturados entre si, como apareciam conotados com o conceito metafísico de alma. Conforme Leibniz afirmou, ao referir-se às *mónadas*, na obra *Système nouveau de la nature et de la communications des substances*, publicada em 1695, “a sua natureza consiste na força, devendo conceber-se à imitação da noção que temos das almas”. (Schurmann, tomo 1, p. 260). A acção, a energia, tal como a alma, revelava-se a causa originária dos mais variados efeitos.

É sabido que Newton, o grande

arquitecto da mecânica clássica, optou pela «solução» cartesiana para a tradução da “força movente” dos corpos, assentando toda a sua mecânica na quantidade de movimento (Newton chamava-lhe apenas movimento). Cremos que este facto também contribuiu para que o conceito de energia só tardiamente se tenha consolidado.

Ao contrário do que se poderá pensar, mesmo com esse prodigioso produto da mente humana que são os *Principia* de Newton, os conceitos de força e de energia não se despiram da sua conotação causal, mais ou menos metafísica, e continuaram a ser muitas vezes confundidos. A força a distância de Newton foi objecto de muita especulação metafísica. Aliás, podemos dizer que a própria atitude de Mach e de Hertz, ao pretenderem erradicar o conceito de força, se deve ao facto de este conceito se ter mantido sempre bastante confuso mesmo na linguagem científica.

A conotação causal inerente à força viva foi transportada para a energia, quando, no século passado, se deu a substituição da designação *força viva* pela de *energia cinética* (designação de Kelvin) ou *energia actual* (designação de Rankine). Para ilustrarmos este facto, transcrevemos a primeira frase acerca da força viva que a 51ª edição de um livro francês de Física dos finais do século passado possui: “Todo o corpo em movimento é capaz de produzir num dado momento efeitos mecânicos, cuja grandeza depende ao mesmo tempo da sua massa e da sua velocidade. Tal é o caso, por exemplo de um martelo a embater num obstáculo, de um projectil lançado por uma arma de fogo, etc. Esta potência dinâmica que possuem todos os corpos em movimento é designada sob o nome de força viva ou energia actual.” (Langlebert, 1896, p. 19).

Segundo o relato histórico de Rankine, o termo energia foi introduzido na Física por Thomas Young, ao propor, em 1803, que o termo «força viva» (com todas as suas conotações) fosse substituído pela palavra energia (Locqueneux, 1989, p.65). Mais tarde, a força viva veio a originar a energia cinética e a força morta redundou na energia potencial. E a *confusão entre energia e força também se estendeu à energia potencial*. Veja-se, por exemplo, a seguinte afirmação transcrita da 51ª edição do livro francês atrás referido: “este modo de energia recebeu o nome de energia potencial ou força de

tensão, para a distinguir da energia actual ou força viva dos corpos em movimento.” (Langlebert, 1896, p. 20).

Apesar dos progressos ocorridos na primeira metade do século XIX, a que posteriormente nos referiremos, que conduziram ao nascimento dessa nova área científica que é a Termodinâmica, a palavra força continuava a ser utilizada para traduzir o conceito actual de energia (Mason, 1962, p.400). A este respeito, é sugestiva a seguinte frase de Sadi Carnot, e que consta da sua famosa obra *Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, publicada em 1824: “Podemos comparar, com bastante exactidão, a potência motriz do calor à de uma queda de água. A potência motriz da queda de água depende da altura de queda e da quantidade de água; a potência motriz do calor depende da quantidade de calórico empregado e do que denominamos altura de queda, isto é, a diferença de temperatura dos corpos entre os quais o calórico é transferido.” (Carnot, 1987, p. 49).

Esta célebre frase de Carnot, um dos pioneiros da Termodinâmica (Rosmorduc, 1983 e Science & Vie, 1989), mostra como era ainda obscuro o conceito de energia. O calor era encarado como um fluido imponderável, o calórico. E mesmo que quisessemos admiti-lo como uma forma de energia, então esta resultaria numa grandeza não conservativa, já que produzia trabalho sem se consumir (tal como a água da queda, no raciocínio de Carnot).

Numa memória desse cientista, que em 1878, 46 anos após a sua morte, foi entregue por seu irmão Hipólito Carnot à Academia de Ciências de Paris, pode ler-se: “O calor não é outra coisa a não ser a potência motriz (leia-se energia), ou melhor, o movimento que mudou de forma. É um movimento das partículas do corpo. Sempre que haja destruição de potência motriz, há ao mesmo tempo produção de calor, numa quantidade exactamente proporcional à quantidade de potência motriz destruída. Reciprocamente, sempre que haja destruição de calor, há produção de potência motriz.... Pode-se, pois, considerar como tese geral, que a potência motriz se conserva em quantidade invariável na natureza, que não pode ser nunca verdadeiramente produzida nem destruída. Na verdade muda de forma... mas não é jamais aniquilada”.

Transparece claramente da leitura

desta memória que Carnot, esse notável criador do segundo princípio da Termodinâmica, tinha a consciência de que o calor não é um fluido, mas sim movimento das partículas dos corpos. E mais: que dominava todo o quadro conceptual em que assentou o estabelecimento da lei da conservação da energia, incluindo a equivalência entre o calor e o trabalho e um valor para o factor de equivalência. Porque não publicou ele este trabalho mais cedo, o que o tornaria no legítimo criador também do primeiro princípio da Termodinâmica? Porque utilizou ele a teoria do calórico e a analogia substancial com a água, criando uma incompatibilidade lógica entre os dois princípios da Termodinâmica? Não será este um dos muitos exemplos da influência conservadora a que os cientistas estão sujeitos pelos paradigmas dominantes?!

É também significativo o facto de alguns dos principais trabalhos pioneiros da Termodinâmica, publicados nos meados do século passado, usarem sistematicamente a palavra força como sinónimo de energia, como aliás transparece dos respectivos títulos:

- *Observações acerca das forças da natureza inanimada*, publicado por J. Mayer em 1842;
- *Sobre a conservação da força*, da autoria de Helmholtz e escrito em 1847;
- *Sobre a força motriz do calor e as leis que podem deduzir-se do estudo desta questão, aproveitáveis para a teoria do calor*, cujo autor foi Clausius em 1850.

A evolução do conceito de calor e a origem de algumas concepções erradas acerca dele

Uma outra linha histórica decisiva para a compreensão do conceito de energia é a que tem que ver com a evolução das ideias sobre o calor.

Há vestígios do uso técnico ou doméstico do calor que remontam a uns 6000 anos antes da nossa era. Mas na antiguidade confundia-se sistematicamente o calor com os seus efeitos térmicos ou luminosos. Platão considerava o calor como o movimento das partículas da matéria provocado pela penetração desta pelo fogo. Aristóteles via no calor um elemento oculto formado por partes em movimento perpétuo. Esta ideia antiga do *calor-movimento* foi pela primeira vez defendida por Francis Bacon no

Novum Organum, publicado em 1620 (Selleri, s/d, p.51). A ele se seguiram, entre outros, Roger Bacon, Boyle e Descartes. Mas, a esta ideia de que *o calor é movimento*, viria a opor-se a ideia de que *o calor é um fluido*. Esta concepção do *calor-substância*, foi perfilhada por muitos cientistas, entre os quais podemos citar Galileu, Gravesande, Musschenbroek, Crawford, Black, Lavoisier, Laplace e Carnot. Alguns deles defenderam essa ideia com grande convicção e chegaram a considerar o calor uma matéria ponderável, outros houve que hesitaram entre as duas teorias. Este modelo do calor-substância teve o seu zénite no século XVIII, quando o paradigma mecanicista estava no seu auge, e as explicações científicas se baseavam em 6 fluidos imponderáveis. Em 1906, ainda Chwolson escrevia o seguinte: "Outrora, admitia-se a existência de 6 agentes diferentes, dois agentes eléctricos, dois agentes magnéticos, o calórico, e o agente produtor dos fenómenos luminosos.... O número destas substâncias hipotéticas diminuiu com o desenvolvimento da ciência e actualmente não temos mais do que uma. A probabilidade da hipótese da existência deste agente único é extremamente vizinha da certeza. Chamamos a este agente éter". (Tomo 1, 1º Fasc, p. 7).

O *calórico*, um conceito criado por Black, era um *fluido indestrutível, imponderável, altamente elástico, auto-repulsivo, que penetrava os corpos frios quando situados nas proximidades dos corpos quentes*. O mesmo Black acreditava, por exemplo, que quando uma substância muda do estado sólido para o líquido, ou do líquido para o gasoso, havia uma verdadeira combinação entre o fluido calórico e essa substância, a qual tinha como consequência o calor ficar armazenado e escondido na substância, num estado latente, capaz de ser devolvido na mudança de estado inversa: daí derivou a designação *calor latente* atribuída ao calor absorvido ou libertado nas mudanças de estado físico. A capacidade calorífica (actual capacidade térmica) era a capacidade para absorver o calórico. O princípio fundamental da calorimetria traduzia a conservação do calórico.

Em 1789, *Lavoisier*, o pai da Química moderna, considerava o *calórico* como o *dissolvente da matéria*, quando esta fundia ao ser aquecida, e acabou por considerar esse fluido como *um dos elementos fundamentais constitutivos da*

matéria, conjuntamente com o oxigénio, o azoto, o hidrogénio e a luz.

Vemos, assim, que a substantificação do calor teve a sua história, que envolveu prestigiados cientistas.

Mais tarde, Benjamim Thompson, Conde de Rumford, quando dirigia a perfuração de canhões num arsenal de Munique, procedeu a uma investigação em que concluiu que o modelo do calórico não explicava os resultados das experiências por ele efectuadas. Einstein e Infeld, na sua conhecida obra *A evolução da Física*, apresentam um extracto de uma memória que Rumford publicou em 1798 (*An inquiry concerning the weight of heat*) acerca do modo como ele procedeu à investigação, e como chegou a essa conclusão (Einstein e Infeld, 1966, p. 44). Rumford convenceu-se de que o calor era, seguramente, uma grandeza que resultava do movimento e da fricção dos corpos (Ronan, 1987, p.45) e, na sua obra *Philosophical Transactions*, publicada em 1798, declarou o seguinte: "Não consigo obter qualquer representação do calor se não o considerar como movimento." (Abelès et al, 1966, p.114).

Por sua vez, Davy realizou, em 1799, uma experiência que consistiu em friccionar dois cubos de gelo, inicialmente a -2 °C, fundindo-os e obtendo água líquida a +2 °C. Como a capacidade térmica mássica da água é maior do que a do gelo, não é possível atribuir a produção de calor à diferença de capacidades térmicas do gelo e da água, pelo que esta experiência se revelou extraordinariamente convincente.

Era o triunfo, na história da ciência, do modelo do *calor-movimento* sobre o modelo do *calor-substância*. Podemos afirmar que, com Benjamim Thompson, se iniciou um longo percurso conducente à ideia de que *o calor é uma forma de energia que tem que ver com o movimento das partículas dos corpos*, percurso esse que passou pelo trabalho de cientistas como Sadi Carnot, Julius R. von Mayer, James Prescott Joule, Rudolf Clausius e William Thomson, o célebre Lord Kelvin. Mas, ao longo desse percurso, as ideias acerca do calor iam-se desenvolvendo com hesitações, imprecisões e contradições, algumas das quais prevaleceram até hoje. Vejamos algumas:

- O próprio B. Thompson, ao mostrar que o calor resulta do movimento das partículas, também mostrou que o chamado calor radiante também se pro-

paga no vazio. Então se o calor consiste no movimento de partículas, e se no vazio não há partículas, como pode o calor propagar-se no vazio?

- A confusão entre luz e calor, que é uma das concepções alternativas hoje detectadas (ver secção anterior), é um resquício histórico. Trabalhos como os de Lambert, em 1777, que estende ao calor as leis de propagação da luz, os de Rochon, em 1783, e os de Seebeck sobre a difracção do calor, que falavam em raios caloríficos, quando as experiências que efectuavam diziam respeito a raios luminosos, conduziram a essa confusão. Mesmo depois dos trabalhos de Maxwell e Hertz, que “fizeram luz” acerca da natureza ondulatória electromagnética da luz, ainda persistiu a confusão entre luz e calor. Quem, por exemplo, analisa o capítulo XXIX da referida 51ª edição (Langlebert, 1896, p. 568-579) intitulado calor radiante, conclui que está a estudar óptica e não o calor. A determinada altura é o próprio frio que, à semelhança do calor, é tratado como luz. O italiano *Della Porta*, por exemplo, estabeleceu algumas leis acerca do comportamento do frio, entre elas esta: “É curioso observar que o frio se reflecte num espelho tal como o calor”.

A concepção confusa de que o calor é algo que está contido nos corpos ainda hoje persiste em muitas mentes, mesmo depois de terem estudado formalmente o tema energia. Esta concepção resulta, quanto a nós, de uma extrapolação do modelo *calor-movimento* associada ao paradigma do éter que se arrastou até, pelo menos, ao final da primeira década do nosso século⁶). Vejamos, por exemplo, algumas afirmações relacionadas com o calor retiradas de alguns livros dos finais do século passado e do nosso século:

“Admite-se hoje que o calor é o resultado de um movimento vibratório, muito rápido e muito pequeno, das moléculas da matéria ponderável, transmitida de um corpo a outro por intermédio de um fluido espalhado por todo o universo e que se chama éter” (Langlebert, 1896, p. 145).

“O calor é o resultado de um movimento vibratório particular das moléculas dos corpos quando apreciado directamente pelos órgãos da sensibilidade geral. As sensações que se experimentam quando se tocam os corpos e que se diz que estão quentes, frescos ou frios

são devidas a esta forma de movimento vibratório mais ou menos rápido.... As vibrações caloríficas distinguem-se das vibrações sonoras por as primeiras serem mais rápidas e de menor amplitude, por se transmitirem pelo éter e impressionarem os órgãos de sensibilidade geral...” (Nobre, 1895, p. 215).

“Um corpo quente tem as suas partículas vibrando com mais rapidez do que um corpo frio; de modo que, friccionando os corpos, percutindo-os, comprimindo-os, etc., a energia mecânica despendida vai activar as vibrações das moléculas, isto é, vai aparecer sob a forma de calor, que é a energia molecular. A elevação de temperatura dum corpo corresponde ao acréscimo desta energia, o abaixamento de temperatura à sua diminuição.” (S. Silva e A. Machado, s/d, p. 377).

Nestas e em muitas outras afirmações que lemos acerca do calor⁷, as representações confusas que estão subjacentes poderão ser resumidas do seguinte modo:

- o calor aparece como uma energia contida no corpo, umas vezes como sinónimo de energia interna, outras como sendo uma parte cinética da energia interna,

- o calor aparece confundido com a grandeza temperatura;

- o calor aparece como sinónimo de luz.

Estas são, afinal, três das confusões reveladas por muitos dos nossos estudantes.

A conservação da energia

A ideia actual de que a energia é um invariante matemático nos sistemas isolados levou muito tempo a ser fundamentada e passou, sem dúvida, pela descoberta de que se trata de uma grandeza que é *abstracta e multifacetada*. Esta ideia de conservação, bem como a ideia de degradação, revelaram-se historicamente fundamentais para a compreensão do conceito de energia e, em nossa opinião, também são decisivas para o domínio desse conceito pelos nossos alunos.

Poderemos talvez vislumbrar sete linhas de investigação que conduziram à ideia actual da conservação da energia:

- Toda a série de trabalhos que culminaram no estabelecimento, em 1740, por J. Bernoulli do princípio da conservação da força viva, e a que já nos referimos.

- As investigações de Rumford, Davy e outros que levaram à substituição da teoria do calórico pela do calor - movimento e calor-energia, a que também já fizemos referência.

- As investigações de Carnot, Meyer, Joule, Rowland e Miculescu, Hirn, Puluij, etc (Chwolson, 1910, pp. 417-422), que permitiram o estabelecimento da equivalência entre calor e trabalho.

- O desenvolvimento do conceito de trabalho e o estabelecimento da sua relação com a força viva, bem como toda a investigação que conduziu à ideia de que a energia mecânica se conserva em sistemas a que hoje chamamos sistemas conservativos

- As investigações sistemáticas, levadas a cabo no séc. XIX, da energia eléctrica e da energia química que conduziram à descoberta da sua interconvertibilidade (observada nas pilhas e nos voltâmetros) e à verificação do facto de ambas as formas de energia poderem desaparecer para originar calor e poderem, também, transformar-se em energia mecânica.

- Os trabalhos de Maxwell e Hertz que conduziram à ideia de que a energia se encontra disseminada pelos campos de forças.

- A equivalência massa-energia de Einstein.

Como dessas sete linhas já nos referimos de modo necessariamente sucinto às duas primeiras, vamos agora fazer o mesmo para as outras cinco.

Já em 1798, por ocasião da célebre experiência de Munique, Rumford se propôs estabelecer um valor para o equivalente mecânico do calor, J. Sadi Carnot teve a ideia da conservação da energia e chegou a obter um valor para o equivalente mecânico, mas não publicou o seu trabalho. O primeiro cientista que desenvolveu um método de determinar esse equivalente J foi M. Seguin. (Schurmann, T. 1, p. 142). Mas foi J. Mayer quem, na sua obra *Observações acerca das forças da natureza inanimada*, publicada em 1842, traduziu pela primeira vez a ideia da existência de uma “indestrutibilidade das forças da nature-

za", e, simultaneamente, apresentou um valor do equivalente mecânico do calor bastante aproximado do actual. É, graças a esta obra, que J. Mayer é considerado o criador do princípio da conservação da energia.⁸

A repercussão que a obra de Mayer teve nas décadas seguintes fica a dever-se, em grande parte, ao trabalho experimental de Joule e de vários outros cientistas que desenvolveram métodos de determinar J , entre outros Colding, Hirn, Callendar, Viscardi, etc. Foi graças a todos esses experimentadores que se confirmou a existência de uma factor de equivalência universal entre o calor e o trabalho mecânico, que se revelou decisivo para a aceitação do primeiro princípio da Termodinâmica, suporte da lei geral da conservação da energia.

Entretanto, outros cientistas enun-

ciaram também a mesma lei. Assim, por exemplo, em 1847, Helmholtz escrevia na sua obra *Sobre a conservação da força* o seguinte: "[...] se trabalho, calor, electricidade, se podem transformar uns nos outros, é porque não passam de formas diferentes de algo que não varia, qualquer coisa que ora vemos sob a forma de calor, ora sob a forma de luz, ora sob a forma de trabalho mecânico. Esta qualquer coisa é a energia. Toda a natureza está cheia de uma enorme e invariável quantidade de energia, que nos surge sob aspectos diversos, se bem que permaneça quantitativamente a mesma."⁹ (Rousseau, s/d, p.367)

O desenvolvimento do conceito de trabalho, intimamente relacionado com o de energia, foi também importante para o estabelecimento da lei da conservação da energia. Foi em 1807 que Young

introduziu na física teórica o conceito de trabalho. o qual já tinha sido tratado numa perspectiva prática por James Watt. Foi também esse cientista quem, pela primeira vez, relacionou o trabalho com a força viva, podendo considerar-se o pioneiro do chamado *teorema das forças vivas*, segundo a qual o trabalho resultante das forças que actuam numa partícula é igual à variação da sua semi-força viva (actual lei do trabalho-energia ou lei da energia cinética).

Em 1826, Poncelet definiu com mais rigor o trabalho de uma força, através do produto da força pela distância. Sexl (1981, p.287) levanta a questão de como justificar a escolha da distância e não do tempo. Quando «trabalhamos» durante 7 horas seguidas sentimos bem como o tempo é decisivo. Como explicar, então, o facto de Poncelet ter adoptado aquela definição? Sexl não adianta qualquer justificação para o facto, e afirma mesmo que se torna "difícilmente possível explicá-lo de um modo satisfatório". Interrogamo-nos se Poncelet não teria adoptado essa definição pelo facto de pretender medir a força-viva comunicada às partículas, já que, de facto, essa grandeza é igual à variação da semiforça-viva. Aliás, a palavra trabalho, designando o produto de uma «força morta» pelo deslocamento, já tinha sido utilizada por Lazare Carnot, em 1829, mas sem lhe precisar o significado (Locqueneux, 1989, p.65).

A investigação da aplicação do *teorema das forças vivas* aos sistemas de partículas, e a da aplicação da lei da conservação do trabalho nas máquinas, levou a que os cientistas passassem a falar numa dissipação da força viva e num trabalho das resistências passivas (Jamin, 1886, p. 5 do capítulo dedicado à Termodinâmica). Mais tarde viria a ver-se a importância fundamental entre forças conservativas e não conservativas, sendo certo que a validade da lei da conservação da energia mecânica num sistema isolado exige a não actuação de forças não conservativas, facto este muitas vezes esquecido pelos nossos alunos.

Foi em 1852 que Rankine apresentou uma definição mecanicista de energia, que ainda hoje é transcrita em quase todos os livros de Física: "energia é a capacidade de realizar trabalho" (Dampier, 1986, p. 121). Essa definição, porque é limitativa, prestou-se, e ainda se presta hoje a confusões nos nossos alunos. O trabalho é uma grandeza defi-

Équivalent mécanique de la chaleur.

MÉTHODES.	OBSERVATEURS.	DATE.	RÉSULTAT
Compression de l'air.	Joule (1).	1845	443,8
Expansion de l'air.	Id.	Id.	437,8
Expériences sur les machines à vapeur.	Hirn (4).	1857 1860-1861	413,0 420-432
Expansion et contraction des métaux.	Edlund (1).	1865	443,6 430,1
Frottement de l'eau dans les tubes.	Joule (2).	1843	424,6
Id. dans un calorimètre.	Joule (2).	1845	438,3
Id. id. id.	Joule (1).	1847	438,9
Id. id. id.	Joule (2).	1850	423,9
Frottement du mercure dans un calorimètre.	Id.	Id.	424,7
Id. de plaques de fer.	Id.	Id.	425,2
Id. des métaux.	Hirn (4).	1857	371,6
Id. id.	Favre (1).	1858	413,2
Id. id.	Hirn (4).	Id.	400-450
Forage des métaux.	Id.	1858	425
Eau dans la balance à frottement.	Id.	1860	434
Écoulement des liquides sous une forte pression.	Id.	Id.	432
Écrasement du plomb.	Id.	Id.	425
Frottement des métaux.	Puluj.	1846	426,6
Id. de l'eau dans un calorimètre.	Joule.	1848	423,9
Id. id.	Rowland	5° 36° 1880	420,8 425,8
Échauffement produit par les courants magnéto-électriques.	Joule (1).	1843	460
Échauffement d'un disque entre les pôles d'un aimant.	Vielle (2).	1870	435,2 434,9 435,8 437,4
Chaleur développée dans un fil dont la résistance absolue est connue.	Quintus Icilius (12).	1857	399,7
Id.	Weber (13).	Id.	396,4
Id.	Lenz-Weber.	1850	478,2
Id.	Joule (1).	1867	420,5
Id.	H.-F. Weber.	1878	428,15
Diminution de la chaleur dégagée dans une pile quand le courant produit du travail.	Joule (1).	1843	499
Id.	Favre (1).	1858	443
Chaleur produite par le courant électrique, équivalent électrochimique de l'eau : 0,009379, résistance absolue, force électromotrice de l'élément Daniell, chaleur développée par l'action du zinc sur le sulfate de cuivre.	Weber, Bosscha, Favre et Silhermann.	1857	432,1
Chaleur développée dans la pile de Daniell. Force électromotrice de l'élément Daniell.	Joule. Bosscha (11).	1839	419,5

(1) Joule, *Phil. Mag.*, 3^e série, t. XXVI. — (2) *Ibid.*, t. XXIII. — (3) *Ibid.*, t. XXVI. — (4) *Ibid.*, t. XXVII. — (5) *Ibid.*, t. XXXI. — (6) Bus, *Théorie mécanique de la chaleur*, 1^{re} série, 3^e édition. — (7) Edlund, *Pogg. Ann.*, t. CXIV, 1865. — (8) Favre, *Comptes rendus*, 15 février 1858. — (9) Vielle, *Annales de Chimie et de Physique*, 4^e série, t. XXII, p. 64. — (10) Quintus Icilius, *Pogg. Ann.*, t. CL, p. 69. — (11) Bosscha, *Pogg. Ann.*, t. CXXVIII, p. 152. — (12) Report of the Committee of Electrical Standards, p. 125, 1873. — (13) H.-F. Weber, *Phil. Mag.*, 4^e série, t. XXX. — (14) Favre, *Comptes rendus*, t. XLVII, p. 599.

nida em mecânica. Por outro lado, mesmo nos fenómenos de movimento, há sempre energia que não implica realização de trabalho. Destes factos resulta alguma dificuldade em dissociar o conceito de energia do conceito de energia mecânica, a qual conduz a incorrecções. Esta dificuldade de alguns dos nossos alunos, também teve a sua história. Veja-se, a propósito, a seguinte frase transcrita de um conhecido manual português dos finais do séc. passado: “Energia mecânica de um corpo ou simplesmente energia de um corpo, em um momento dado, é a faculdade que esse corpo possui de produzir trabalho” (Nobre, 1895, p. 45).

Foi ainda Rankine quem distinguiu *duas grandes formas de energia*: a *energia potencial* (ou energia em estado latente) e a *energia actual* (designação que Kelvin viria mais tarde a substituir por cinética). E enunciou o *princípio da conservação da energia* nos seguintes termos: “A soma da energia actual e da energia potencial do universo é constante.” (Schurmann, 2º Vol., p. 306, s/d)

Em 1865, quando Lord Kelvin publicou (em colaboração com Tait) o seu tratado de Filosofia Natural, ele já possuía a ideia de que a energia de um corpo era uma grandeza não efectivamente mensurável, mas apenas avaliável a menos de uma constante, conforme transparece da sua conhecida definição de energia de um corpo: “é a medida, em unidades de trabalho, de todos os efeitos exteriores ao corpo necessários para o levar do estado em que se encontra até outro fixado convencionalmente.”

O conceito de energia e o princípio de conservação de energia aparecem tratados com grande rigor científico num trabalho publicado em 1887 por Max Planck e intitulado *Das Prinzip der Erhaltung der Energie*.

Foi, portanto, em consequência de todos estes trabalhos que, no séc. XIX, ficou definitivamente esclarecido o falso problema de traduzir por uma só grandeza física o efeito da actuação de uma força num corpo. Verifica-se que, quer a quantidade de movimento, quer a semiforça-viva ou energia cinética podem e devem ser utilizadas, mas em situações diferentes: a primeira, quando se tem em conta a variação da força no tempo e se utiliza o impulso da força; e a segunda, quando se tem em conta a variação da força no espaço e se considera o trabalho da força.

Uma outra linha de investigação

que se revelou fundamental para o estabelecimento da lei geral da conservação da energia passou pelos trabalhos de Faraday, profundo crente na possibilidade de unificação das “forças da natureza”. Em 1807, nos Anais de Química, o russo Grotthuss e o inglês Davy publicaram os primeiros trabalhos sobre *electrólise* que viriam a despertar Faraday, entre outros, para o estudo da importante transferência de energia que nela ocorre. Mas, se esse facto constituiu um passo enorme no progresso experimental, rumo ao aproveitamento da energia, o progresso teórico tendente a clarificar o conceito, e a despi-lo de toda a conotação com a força e com os supostos fluidos imponderáveis, pouco avançou. Na comunicação de Davy, por exemplo, lá aparecem expressões como “energia repulsiva”, “energia atractiva”, etc.

Na sua obra *Sobre Energética*, publicada em 1855, Rankine considera a energia como «matéria imponderável» e a «matéria ponderável» como o suporte da energia. Começa aqui a desenhar-se uma visão do *universo totalmente preenchido por matéria e energia*, um universo onde se admite o vácuo de matéria mas não o de energia. Esta visão de um universo cheio, que já Descartes defendia, fortalece-se extraordinariamente com o aparecimento da teoria electromagnética de Maxwell, na qual a energia passa a ser associada aos campos de forças, disseminando-se neles com uma densidade proporcional aos quadrados das respectivas intensidades de campo. Como os campos se estabelecem também no vazio material, também lá existe energia eléctrica e energia magnética, as quais aparecem associadas nas ondas electromagnéticas que se propagam por toda a parte.

Com Maxwell, fica definitivamente estabelecida a ideia de que a radiação também é um meio de transporte de energia, um meio peculiar em que o transporte de energia não é acompanhado simultaneamente pelo transporte de matéria.

Esta dicotomia universal matéria ponderável-matéria imponderável é perilhada por Mayer, Rankine e os energetistas. Em 1888, Hirn considera que o universo é formado por dois constituintes, a *matéria ponderável* e um *elemento dinâmico*, sendo este a união imponderável dos corpos de matéria ponderável e, de certo modo, responsável pelo que lhes acontece. Quantas destas ideias ou ideias similares não estarão disseminadas

nas mentes dos nossos alunos?¹⁰

Quem analisar um dos melhores tratados de Física dos princípios do nosso século- o tratado de Física de Chwolson¹¹, verifica que, aliado a um rigor já notável no tratamento de muitas formas de energia, ainda se sente a necessidade do éter como suporte material para as ondas electromagnéticas. Lá aparecem duas formas de energia associadas a esse meio, a *energia radiante do éter* e a *energia cinética do éter*, esta a energia da corrente eléctrica.

Chwolson, nesse seu *Tratado*, discrimina várias formas de energia cinética e de energia potencial. Considera como *formas de energia cinética* a energia do movimento dos corpos, a energia calorífica, a energia da corrente eléctrica e a energia radiante. Considera como *formas de energia potencial* a energia gravítica entre os corpúsculos materiais, a energia elástica dos corpos deformáveis, a energia química, a energia electrostática e a energia magnética.

Ainda no século passado o princípio da conservação da energia começou a ser posto à prova. Com a descoberta dos raios X e da radioactividade revelavam-se fenómenos que poderiam vir a constituir uma violação desse famoso princípio. Mas, felizmente, em 1905, Einstein publicou um artigo «miraculoso» que viria a permitir integrar os fenómenos nucleares no quadro da lei da conservação da energia. Nesse artigo, Einstein defendeu a tese, hoje sobejamente confirmada, de que *a massa de um corpo é uma medida do seu conteúdo de energia* (Einstein, 1905, p.90); e escreveu o seguinte: “[...] se a energia sofrer uma variação igual a L, a sua massa sofrerá, no mesmo sentido, uma variação igual a L/9.10²⁰ se a energia for medida em ergs e a massa em gramas.”

A relação einsteiniana de equivalência entre massa e energia

$$E_0 = m c^2$$

ampliava, assim, o conceito de energia, tornando-o aplicável à própria massa das partículas de matéria.

Com Einstein, nasceu a ideia de que *uma partícula de matéria, mesmo isolada, em repouso e não excitada, possui uma energia própria correspondente à sua massa, que o mesmo é dizer, possui energia pelo simples facto de existir com inércia*. A massa da partícula de matéria é, no fundo, energia que ali está

altamente concentrada (devido ao elevado valor de c) e, se, de algum modo, a referida partícula aumentar esse conteúdo de energia, a sua massa também aumentará concomitantemente e vice-versa.¹²

Se, nos finais do século passado, era ideia comum a de que a massa se encontra disseminada de modo descontínuo pelos corpúsculos de matéria, a energia era unanimemente reconhecida como uma grandeza distribuída de modo contínuo pelo universo. Só a partir dos primeiros anos do nosso século se começou a cimentar a ideia de que a energia também se encontra disseminada de modo descontínuo, graças aos trabalhos de Planck sobre a radiação do corpo negro, de Einstein sobre o efeito fotoeléctrico, e de Bohr sobre os modelos atómicos. A energia é emitida e absorvida pelos átomos sempre em quantidades múltiplas de valores mínimos ou unidades naturais de energia, os *quanta* de energia, e *nunca em fracções do quantum*.

A degradação da energia

A exemplo do que sucedeu com a ideia de conservação da energia, a de *degradação da energia* também levou muito tempo a construir-se. Podemos afirmar que a sua história remonta aos tempos em que o homem começou a aproveitar as mais diversas máquinas para a realização de trabalho útil, particularmente a máquina a vapor. A história desta tem, no dizer de Thurston, dois períodos: o *período especulativo* e o *período de aplicação*.

O período especulativo inicia-se com a eolípila de Herão de Alexandria 2 séculos a.C., um aparelho constituído por uma esfera posta a mover pela força de tensão do vapor de água (Schurmann, 1º vol, p.55, e Jamin, p.1). Só muito mais tarde, nos primórdios do século XVII, foi reiniciado o estudo experimental do aproveitamento dessa força quando Della Porta (1601) e Causs (1615) produziram as máquinas de pressão e Branca (1629) a primeira turbina a vapor. Todo este estudo, de cariz eminentemente técnico, viria a conduzir às máquinas do período de aplicação, entre outras, as de Worcester, Papin, Huyghens, Savery e Newcomen, ainda no séc. XVII e, as de Desaguliers e Watt já no séc. XVIII. Os progressos introduzidos por James Watt na máquina a vapor, que foram muitos¹³,

não nos permitem dar-lhe o direito de inventor desse tipo de máquina, como muitas vezes se ouve dizer e aparece escrito.

As primeiras máquinas tinham um rendimento baixíssimo (os primeiros barcos a vapor, de Fulton, viajaram no Sena a uma velocidade máxima de 6km/h). Este facto motivou os cientistas para tentarem compreender a física que estava por trás do funcionamento dessas máquinas. O francês Sadi Carnot, melhor do que ninguém, dedicou-se a essa investigação, e, em 1824, publicou o célebre opúsculo intitulado *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les moyens propres à la développer*. Nessa obra, construída com o modelo do calórico, figuram determinadas asserções (Carnot, 1987) que, traduzidas em linguagem actual, são as seguintes:

1ª- Uma máquina térmica só funciona se dispuser de duas fontes de calor a temperaturas diferentes.

2ª- O rendimento de uma máquina térmica reversível é independente do agente de transformação de calor em trabalho e só depende das temperaturas das duas fontes.

3ª- O rendimento de uma máquina térmica real e, portanto, irreversível é sempre inferior ao rendimento da máquina reversível que funcione entre as mesmas temperaturas.

(Adkins, 1987, p.107, Fermi, 1973, p.30, Rousseau, s/d, p. 364)

Com Carnot ficámos, pois, a saber que é impossível transformar integralmente calor em trabalho, pois o rendimento de uma tal transformação nunca é 100%.

Mais tarde, em 1851 e 1852, Lord Kelvin publicou três trabalhos onde, para além de enunciar um postulado fundamental equivalente ao princípio de Carnot, tratou o problema da «dissipação da energia utilizada pelo homem», conceito que viria mais tarde a ser designado por «degradação de energia», segundo uma proposta de Tait.

Em 1854, Clausius escreveu uma memória onde também se debruçou sobre a teoria de Carnot e articulou-a com o princípio da conservação da energia. Foi ele quem introduziu uma nova e fundamental propriedade termodinâmica, a *entropia*, cuja variação entre dois estados de equilíbrio definiu em termos

matemáticos precisos, a qual abriu novas perspectivas para o segundo princípio da Termodinâmica. Também enunciou um postulado equivalente ao princípio de Carnot.

Já nos finais do século passado, Boltzmann viria a atribuir um significado preciso à grandeza entropia ao relacioná-la, para cada estado termodinâmico de um sistema, com a probabilidade de o sistema existir nesse estado, probabilidade essa que depende do número de micro-estados possíveis correspondentes a esse estado termodinâmico.

Clausius e Boltzmann contribuíram, como ninguém, para a fundamentação do modo como evoluem os processos naturais num sistema isolado. Devido à irreversibilidade desses processos, a entropia total aumenta, a energia vai ficando cada vez mais dispersa por muitas partículas, e diminui, desse modo, a capacidade de se realizar trabalho útil com esse sistema. A entropia quantifica a dispersão da energia, e, a quanto maior desordem estiver associada a energia, menos valor tem para efeito de realização de trabalho útil. Este facto conduziu a que G. Brunhes, na sua obra intitulada *La Dégénération de l'Energie* (1908) considerasse necessário distinguir, a respeito da energia global de um sistema, aquela que se encontra concentrada e ordenada, e, portanto, com grande potencialidade para produzir trabalho útil, e a que se encontra dispersa e desordenada, com fraca potencialidade de produzir trabalho. A primeira, Brunhes chamava *energia-riqueza*, e à segunda, *energia sem valor*. A energia global de um sistema isolado mantém-se, mas a sua energia-riqueza vai diminuindo à medida que vão ocorrendo transformações espontâneas nesse sistema, devido ao carácter irreversível dessas transformações espontâneas.

As dificuldades que os alunos têm a propósito da disponibilidade da energia para realizar trabalho, e o dilema conservação-poupança em que muitos deles caem, têm também o seu paralelismo na história da ciência. Tais dificuldades e um tal dilema foram resolvidos por cientistas como Clausius e Boltzmann, que estabeleceram e clarificaram o conceito de *entropia*, por Helmholtz e Gibbs que trabalharam nos importantes conceitos de *energia livre* e *entalpia livre*, e ainda por Maxwell e novamente por Gibbs, que definiram uma grandeza, hoje muito esquecida, mas igualmente importante,

chamada *exergia*, a qual tem que ver directamente com a energia disponível para realizar trabalho útil. A estas grandezas e à sua importância no ensino da energia nos referiremos no nosso próximo trabalho.

RESUMO

Neste artigo foram passadas em revista diversas «misconceptions» que existem acerca da energia, referenciando historicamente a sua detecção nas múltiplas investigações educativas levadas a cabo na sala de aula. Apresentaram-se fragmentos de história da ciência respeitantes à evolução das ideias acerca da energia, procurando-se patentear que muitas das concepções que os cientistas perfilharam acerca dessa grandeza são, afinal, idênticas às que proliferam nas escolas. Sendo a ciência uma construção humana, ela foi influenciada e influenciou a cultura do cidadão comum ao longo dos séculos (com repercussões na linguagem), cultura essa que, como sabemos, influencia a aprendizagem. Ideias que revelem, por exemplo, uma conotação causal, e/ou uma conotação material, atribuídas à energia, têm raízes histórico-culturais. O mesmo acontece com algumas concepções acerca do calor, tais como a de que o calor é uma propriedade dos corpos mais ou menos identificada com a temperatura, ou a de que o calor é algo de material que transita entre os corpos, ou a de que é uma espécie de luz, etc. Conforme se tentou mostrar, estas concepções também possuem uma nítida raiz histórico-cultural, com uma marcada analogia com determinadas ideias paradigmáticas em certas épocas da ciência.

* Universidade Aberta

BIBLIOGRAFIA

- F. Abelès, et al., *História Geral das Ciências*, Tomo, III, A Ciência Contemporânea, O Século XIX, 1^a volume, Difusão Europeia do Livro, São Paulo, 1966.
- C. Adkins, *An introduction to Thermal Physics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1987.
- P. Black, J. Solomon, *Life-world and science world - pupils' ideas about energy, entropy in the School*, Vol. 1, Roland Eotvos Physical Society, Budapest, 1983.
- J. Bliss, J. Ogborn, *Eur. J. Sci. Educ.* **7** (1985) 195-203.
- A. Brook, *Children's understanding of ideas about energy: a review of the literature*, *Energy Matters* (proceedings of an Invited Conference), University of Leeds, 1985.
- A. Brook, R. Driver, / Driver and Millar (Editores), *Aspects of secondary students' understanding of energy*, Children's Learning in Science Project, University of Leeds, 1984.
- B. Brunhes, *La Dégradation de l'Energie*, Ed. Flammarion, 1908.
- A. Cachapuz, I. Martins, *High school students' ideas about energy of chemical reactions*, Proceedings of the Second International Seminar-Misconceptions and educational strategies in science and mathematics, Cornell University, Vol III, p. 60, 1987.
- M. Caldeira, M. Cruz, A. Nave, R. Pinto, *O princípio da conservação da energia*, Comunicação XVIII da 7^a Conf. Nacional de Física, Lisboa, 1990.
- S. Carnot, *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*, Alianza Editorial, Madrid, 1987.
- O. Chwolson, *Traité de Physique*, Ed. Gauthier-Villars, Paris, 1906.
- J. Cordon, T. Martinez, *História da Filosofia*, Edições 70, 1989.
- A. Cresson, *Aristóteles*, Edições 70, Lisboa, pp.59-60, 1988.
- W. Dampier, *História da Ciência*, Ibrasa, São Paulo, pp 119-126, 1986.
- R. Driver, R. Millar, *Teaching energy in schools: towards an analysis of curriculum approaches*, *Energy Matters* (proceedings of an Invited Conference), University of Leeds, 1985.
- R. Duit, *Eur. J. Sci. Educ.* **3** (1981) 291-301.
- R. Duit, *Students' notions about the energy concept - before and after physics instruction in Problems concerning students' representation of physics and chemistry knowledge* (proceedings of a workshop), Ludwigsburg, Germany, ed. Jung, Pfundt and Rroneck, 1981.
- R. Duit, *Phys. Educ.* **19** (1984) 59-66.
- R. Duit, *In search of an energy concept* *Energy Matters* (proceedings of an Invited Conference), University of Leeds, pp 67-101, 1985.
- Enciclopédia Verbo, vol 7, p. 533, Ed. Verbo, Lisboa, s/d.
- A. Einstein, L. Infeld, *A Evolução da Física*, Zahar Editores, Rio de Janeiro, pp. 39-46, 1966.
- A. Einstein, *A inércia de um corpo será dependente do seu conteúdo energético?*, *Textos Fundamentais da Física Moderna*, 1^o Vol.- O Princípio da Relatividade, F. Calouste Gulbenkian, pp. 87-90, 1972.
- A. Einstein, *Sobre la teoria de la relatividad especial y general*, Alianza Editorial, Madrid, pp. 42-46, 1984.
- A. Favieres, et al., *Una introduccion al concepto de energia baseada en las ideas previas de los estudiantes*, Comunicação OR-25 do 1^o Encontro Ibérico sobre o Ensino da Física, Valladolid, 1991.
- R. Feynman, *The Feynman Lectures of Physics*, Ed Fondo Educativo Interamericano, S.A., Vol. 1-Mecânica, radiação e calor, Bogota, pp 4-1 a 4-12, 1971.
- E. Fermi, *Termodinâmica*, Ed. Almedina, Coimbra, pp. 28-58, 1973.
- F. Fernandes, *Bol. Soc. Port. Quim.*, N^o 6, pp. 4-12, 1981.
- C. Gayford, *Eur. J. Sci. Educ.*, **8** (1986) 443-450.
- P. Gailunas, *School Sci. Rev.* (1988) 587-590.
- J. Gilbert, M. Pope, *Research in Science and Technological Education* **4** (1986) 61-76.
- M. Jamin, *Cours de Physique de L'École Polytechnique*, Gauthier-Villars, Paris, 1886.
- J. Janglebert, *Physique*, 51e Édit., Imprimer. et Libr. Classiques, Paris, 1896.
- R. Locqueneux, *História da Física*, Coleção Saber. Pub. Europa-América, Lisboa, pp. 21, 64-65, 1989.
- S. Mak, K. Young, *School Sci. Rev.* (1987) 464-470.
- I. Martins, *Contributos da investigação*

educacional para o ensino do tema "energia de reacção química", Colóquio "A Energia, a Cultura e a Escola", Lisboa, 1991.

S. Mason, *História da Ciência, As Principais Correntes do Pensamento Científico*, Ed. Globo, Rio de Janeiro, 1962.

F. Nobre, *Tratado de Physica Elementar*, Typ. de J. Mendonça, Porto, 1895.

J. Ogborn *School Sci. Rev.* (1986).

J. Ogborn, *School Sci. Rev.* (1990).

C. Onan, *História Ilustrada da Ciência da Universidade de Cambridge*, Ed. Jorge Zahar, Vol. IV, 1987, pp. 45-48.

P. Rousseau, *História da Ciência*, Ed. Aster, Lisboa, s/d.

J. Rosmorduc, *De Tales a Einstein*, Ed. Caminho, 1983, p.156-163.

T. Russel, H. Munley, /Robin Millar (Editor), Science as a discipline, science as seen by students and teachers' professional knowledge, in *Doing science: images of science in Science Education*, ed. , The Falmer Press, London, 1989.

Silva, E. ; Machado, A. , *Lições Elementares de Física Experimental*, II vol. , Liv. Cruz, Braga, s/d

Selleri, F. , *O que é a energia*, Edit. Notícias, Lisboa, s/d

Sexl, R., *Eur. J. Sci. Educ.* **3** (1981) 285-289.

Shurmann, P., *História de la Física*, vols 1 e 2, Ed. Nova, Buenos Aires, s/d

Solomon, J. , *Eur. J. Sci. Educ.* **5** (1983) 49-59.

Stead, B. , *Energy, Learning in Science Project*, University of Waikato, New Zealand, 1980

M. Summers, *School Sci. Rev.* (1983) 670-76.

K. Taber, *School Sci. Rev.* (1989) 57-62.

R. Trumper, *Int. J. Sci. Educ.* **12** (1990) 343-354.

J. Valadares, D. Pereira, *Didáctica da Física e da Química*, Universidade Aberta, Volumes 1 e

2, Lisboa, pp.48-49 e 141-164, 1991.

M. Valente, D. Pereira, *Gaz. Fis.* **13** (1990).

J. Warren, *Eur. J. Sci. Educ.* **4** (1982) 295-297.

D. Watts, *Phys. Educ.* **18** (1983) 213-217.

D. Watts, Gilbert, J. , *Studies Sci. Educ.* **10** (1983) 61-98.

M. Zemansky, *Phys. Teacher* (1970) .

NOTAS

¹ A grande maioria destas ideias espalhadas na comunidade docente têm sido referidas desde há alguns anos por diversos investigadores (Zemansky, 1970, Warren, 1972, Sexl, 1981, Summers, 1983, Ogborn, 1986, Gayford, 1986, Mak and Young, 1987, Taber, 1989, etc.)

² Esta afirmação, citada de memória, é de Gustavo de Castro, e encontra-se num seu prefácio a um livro de bolso, sobre Relatividade, da colecção Pelicano.

³ O dicionário da Sociedade da Língua Portuguesa, por exemplo, dá como sinónimo de aquecimento, entre outros, *acumulação de calor*, *acaloração*, *calor*.

⁴ A referência deste livro, bem como a de todos os outros de onde retirámos as afirmações incorretas aqui transcritas, não é importante, pois tais asserções não constituem excepções no que respeita a afirmações criticáveis, mesmo no que toca à energia. Julgamos que todos os livros, em maior ou menor abundância, as possuem.

⁵ Por exemplo, ao consultarmos o excelente Curso de Física para L'École Polytechnique, escrito em 1886 por M. Jamim e M. Bouty, dois cientistas ligados à Academia de Ciências de Paris (um livro que conheceu grande prestígio internacional), verificámos que eles usam muitas vezes o peso com o significado de massa

⁶ Se avaliássemos a queda do paradigma do éter pela aceitação da teoria da relatividade restrita que o rejeitou, diríamos que pelo menos nas duas primeiras décadas do nosso século ainda o paradigma se mantinha, conforme indiciam muitos factos, tais

como: nas conferências de Haarlem, em 1913, ainda Lorenz (quem mais contribuiu, para além de Einstein, para a própria teoria da relatividade) não tinha aceite a derrocada do éter (e, no dizer de Born, nem nunca a aceitou); em 1921, Einstein recebeu o prémio Nobel pelo seu trabalho sobre o efeito fotoeléctrico, e não pela teoria da relatividade; muito depois do trabalho original de Einstein, de 1905, ainda proliferavam os livros de Física em que se considerava a existência do éter.

⁷ Algumas dessas afirmações constam de livros recentes (ver nota 3, p. 5).

⁸ Esta célebre publicação de Mayer foi rejeitada por Poggendorff, por avaliar sistematicamente o movimento pela quantidade de movimento, e não pela força viva. A energia é sistematicamente designada por força, e é considerada «um objecto indestrutível, variável e imponderável...» Toda a linguagem deste trabalho mostra bem as dificuldades com que os cientistas de então se debatiam para caracterizarem essa grandeza fundamental que é a energia

⁹ Esta ideia tão claramente estabelecida por Helmholtz de que a energia é uma quantidade que não muda nas mais diversas transformações que ocorrem na natureza (e sem ninguém saber explicar porquê), conduziu a que muitos cientistas o considerassem como o fundador do *princípio da conservação da energia*, facto esse que Helmholtz humildemente contestou afirmando ter sido J. R. Mayer quem, pela primeira vez, concebeu e exprimiu com exactidão esse famoso princípio.

¹⁰ Releiam-se as concepções dos quatro primeiros alunos na primeira página deste trabalho.

¹¹ A edição que consultámos foi a de 1906.

¹² A este propósito recomendamos a leitura de dois artigos sobre o *conceito de massa* recentemente publicados nos fascículos 1 e 4, vol. 16, da Gazeta de Física da Sociedade Portuguesa de Física.

¹³ Entre outros: separação do condensador e do cilindro; a caixa de distribuição para conseguir o efeito duplo, o regulador de força centrífuga, o manómetro de mercúrio e o indicador de nível.

APÊNDICE VI

ALGUNS ASPECTOS ESSENCIAIS SOBRE A ENERGIA

Alguns Aspectos Essenciais sobre a Energia

JORGE VALADARES*

Conscientes da existência de concepções empíricas incorrectas sobre a energia profundamente enraizadas na linguagem do dia a dia e com conotações históricas, teremos que lhe atribuir a importância que têm no processo de ensino-aprendizagem. Deveremos partir do conhecimento dessas concepções e adoptar estratégias conducentes a rebater e não reforçar, essas concepções incorrectas. Estas estratégias passam por um tratamento cuidado de alguns aspectos essenciais sobre a energia que vamos focar em seguida de um modo necessariamente breve mas exemplificativo.

1. FORMAS FUNDAMENTAIS DE ENERGIA

A energia é uma grandeza associada a todos os constituintes do universo desde a sua origem. Em escala crescente poderemos dizer que ela está associada aos quarks e léptões, aos hádrões, aos átomos e moléculas, às células, tecidos e órgãos, aos seres vivos e inanimados, às estrelas, planetas e cometas, às galáxias, aos enxames de galáxias e aos superenxames de galáxias. Em suma, a energia está associada a toda a matéria e à radiação mas não se poderá confundir com elas.

Como a energia aparece associada a todas as manifestações de força e de movimento, ela intervém em todos os fenómenos, mecânicos, térmicos, ópticos, sonoros, etc. Está presente em todo o universo material e também no chamado universo fotónico acompanhando a radiação que enche todo o vazio de matéria. A energia constitui a essência da acção, já que todo o acto ou gesto, por mais insignificante que seja, envolve transferência de energia.

Dada a universalidade da energia e as suas mais diversas manifestações, surgiu uma imensidão de qualificativos a ela aplicados, o que só contribui para a confusão acerca desse conceito (Taber, p. 59). Reparemos, por exemplo, nas designações *energia calorífica*, *calor*,

fluxo calorífico, *fluxo de energia calorífica*, *fluxo de energia térmica* e *energia térmica em trânsito*. Não pretenderão todas significar o mesmo? Para o professor bem preparado, estas diferentes designações não constituem problema. Mas, no que se refere ao aluno, só servirão para o confundir. E, pior do que isto, se analisarmos a mesma designação, a *energia térmica* em varios livros, ela surge com significados distintos: nuns significa o mesmo que calor, noutros identifica-se com energia interna e noutros, ainda, procura traduzir uma parte da energia interna.

Porque não adoptar o princípio de Guilherme de Ockham, séc. XVIII, segundo o qual "*as entidades não deverão ser multiplicadas para além do necessário*"? No que se refere à energia, há uma grande tendência para contrariarmos este princípio (Gailiunas, p.587). Ora, ganhar-se-ia imenso em clareza se se reduzissem os qualificativos aplicados à palavra energia, falando muito mais em transferências do que em formas de energia. Aliás, as formas essencialmente distintas de energia que se manifestam nos fenómenos vulgares com que lidamos são apenas duas:

- *Energia cinética* ou energia das partículas associada aos seus movimentos;
- *Energia potencial*, ou energia ligada às interacções partículas-campos.

Nos fenómenos relativistas manifesta-se uma outra forma fundamental de energia, a *energia de massa*, ou energia que as partículas possuem, mesmo em repouso e isoladas, "pelo simples facto de existirem" (Feynman, 1989, p. 91).

Estas formas básicas de energia das partículas e dos campos existentes num dado sistema contribuem para a chamada *energia interna*, U , do sistema. Trata-se de uma grandeza termodinâmica que caracteriza o sistema em cada estado de equilíbrio e cuja variação, entre dois estados do sistema, só depende destes. É, pois, uma função termodinâmica de estado. A energia interna de

um sistema varia sempre que o sistema sofre uma transformação de um estado para outro, devido a uma transferência de energia através da sua fronteira. Se considerarmos um sistema fechado, isto é, que não troca matéria com o exterior, a transferência de energia pode suceder por um *processo mecânico* e/ou por um *processo térmico* e/ou por um *processo de radiação*. O primeiro envolve a realização de um *trabalho*. O segundo envolve a transferência de *calor* através da fronteira e dá-se devido à existência de gradientes de temperatura. Pode ocorrer por *condução* ou por *convecção*. O último consiste na emissão ou recepção de *radiação electromagnética*. Tradicionalmente, o último processo estava englobado no segundo, isto é, a radiação era considerado um modo de transferência de calor. Porém, dadas as características particulares do processo de radiação e o facto de não envolver a necessidade de um suporte material, tem vindo a ser modernamente considerado em separado.

Não privilegiamos esta ou aquela abordagem da energia em particular, mas defendemos um rigor de linguagem por parte dos professores que passa pela abolição tanto quanto possível dos qualificativos aplicados à energia, e de toda a conotação material. Mas esse rigor só terá repercussão nos alunos se lhe forem proporcionadas situações de aprendizagem conducentes à incoerência das suas ideias com a realidade natural e experimentalmente vivida. É preferível falar mais em transferências de energia e menos em formas de energia. Mas, ao discutirmos as transferências de energia, há que ter cuidado para não cairmos em análises desajustadas. Um exemplo: quando alguém fala ao telefone, que transformação e/ou transferência de energia ocorre? Uma resposta provável será: transformação de energia sonora em energia eléctrica. Esta resposta é incorrecta. Por um lado, é muito mais significativa a transferência de energia que antecede o acto de falar, do que a que corresponde ao acto de falar. A variação de energia potencial do telefone é considerável (principalmente se pegar-

mos em todo o telefone), enquanto que a eficiência do microfone na passagem da energia do ar vibrante para o microfone é inferior a 1% (Chishokn, 1992). E, além disso, também há que contar com a energia que aquece o ar e o microfone. E, por outro lado, tem de intervir energia eléctrica para amplificar o sinal. E, finalmente, a energia sonora não é mais do que energia mecânica de vibração das moléculas de ar, e o aluno fica com a ideia de que intervém uma qualquer forma misteriosa de energia que apenas tem que ver com o emissor da voz.

2. A ENERGIA NO CORPO HUMANO

Dissemos que todo o acto ou gesto, por mais insignificante que seja, envolve transferências de energia. Assim, consideremos, a título de exemplo, o acto diário de dormir. Mesmo durante o sono e em absoluto repouso, o corpo humano exerce uma actividade metabólica (actividade metabólica basal), na qual consome energia. A energia consumida por unidade de tempo é, em média (Manon e Hornyak, 1985, p. 196):

$$P = 80\text{ W} = 70\text{ Cal/h}$$
$$(1\text{ Cal} = 10^3\text{ cal} = 1\text{ kcal})$$

O esqueleto e principalmente, o coração realizam trabalho, consumindo cerca de 25% dessa energia total metabólica. O cérebro continua em complexa actividade e consome cerca de 19% da energia total. Os rins consomem cerca de 10% da energia e o fígado e o baço cerca de 27%. (Okuno, Caldas e Chow, 1982, p. 115). Além disso, emitimos e recebemos radiações, respiramos e transpiramos, pelo que trocamos energia com a atmosfera. O próprio sangue, ao circular nas veias, liberta energia.

A taxa metabólica do ser humano varia consoante o tipo de actividade que desenvolve: Assim temos, por exemplo, os seguintes valores médios (Marion e Hornyak, 1985, p. 196):

TAXAS METABÓLICAS

	Cal/h	watts
No acto de dormir, descansar e a ouvir conferências	70	80
Actividades leves (passear a pé, trabalho de casa)	250	290
Actividades moderadas (passear de bicicleta, etc)	450	520
Actividades pesadas (jogar basquetebol, etc)	600	700
Actividades excessivas (só aguentáveis durante 1 min)	700	810
Actividades limites (só aguentáveis durante 10 s)	1200	1400

O corpo humano é um sistema que obedece, como qualquer outro sistema na natureza, à lei da conservação da energia. No final de um dia, toda a actividade realizada pelo corpo humano corresponde a uma energia perdida para o exterior, o que se traduziria por um saldo negativo de energia relativamente ao ambiente, não fosse a indispensável actividade da alimentação e, com ela, o fornecimento ao corpo da energia necessária para “pôr o balancete em ordem”.

A energia libertada na combustão dos produtos alimentares é aproximadamente 5 Cal por cada litro de oxigénio consumido, independentemente dos diversos valores calóricos desses produtos, conforme se pode ver na tabela seguinte (adaptada de Cameron, J.R. & Skofronic, J.G. - *Medical Physics*, Addison-Wesley, 1978):

Substâncias	Energia libertada por litro de O ₂ utilizado em kCal/L	Valor calórico em kCal/g
Glucose	5,1	3,8
Carbohidratos	5,3	4,1
Proteínas	4,3	4,1
Gorduras	4,7	9,3
Dieta típica	5,0	—

Uma vez que o oxigénio entra fundamentalmente pelos pulmões (apenas cerca de 2% é absorvido através da pele), a taxa metabólica acaba por ser controlada pelo ritmo e profundidade da respiração e pode medir-se a partir do volume de oxigénio consumido. Compreende-se assim que durante o repouso a nossa respiração seja lenta e pouco profunda, ao contrário do que sucede quando desenvolvemos uma actividade violenta em que a respiração é rápida e profunda.

A pele emite energia por meio de ondas electromagnéticas no domínio do infravermelho. A potência radiante emitida pode calcular-se por meio da lei de Stefan-Boltzmann e depende da temperatura da pele e da temperatura exterior. Feitos uns simples cálculos, chega-se à

conclusão que o valor da potência radiante não se afasta muito do valor da taxa metabólica basal, isto é, o corpo humano em repouso emite na forma de radiação praticamente a energia que absorve nas combustões celulares.

Se a temperatura atmosférica for superior à da pele, o corpo recebe energia em quantidade superior à energia que emite. Mas sucede nessas condições que o corpo começa a transpirar e a evaporação acaba por remover o excesso de energia.

Vemos, por esta pequena referência que a energia desempenha um papel fundamental na vida. O corpo humano funciona como um sistema que transfere energia aproveitando parte dela para a realização dos actos vitais. Esta desenrola-se de modo a que a energia total do universo se vai conservando e degradando simultaneamente.

Abordando temas como este, da energia no corpo humano, ainda que necessariamente de um modo superficial, mostram aos alunos a importância do estudo da Física e da Química, em geral, e da energia em particular.

E dispomos, também, de uma oportunidade de combater a ideia alternativa segundo a qual os alimentos são energia e que ingerir alimentos é como que engolir energia. Os alunos passam a reconhecer a importância do oxigénio, e a sentir a energia como uma grandeza que acompanha todos os processos que ocorrem no corpo humano, que funciona como um sistema que a transfere. E passam a reconhecer que os alimentos, só por si, não serviriam para nada.

3. O DESAPROVEITAMENTO DA ENERGIA NO NOSSO PLANETA

A nossa vida está actualmente dependente de uma enorme e permanente desperdício de energia nas fábricas, nos transportes, nas habitações, etc. Costuma-se mesmo tomar como um dos índices do nível de vida de um povo a “energia que ele consome” *per capita*.

A taxa média de crescimento anual do consumo mundial de matérias primas energéticas foi (Direcção Geral de Energia, 1983, p.7):

- 2,2 % entre 1925 e 1950:
- 5 % entre 1950 e 1975.

Nestes últimos anos, pese embora o esforço que se tem desenvolvido no sentido de economizar as reservas dessas matérias primas, o consumo tem continuado a aumentar conforme se pode ver no quadro seguinte (boletim da OCDE, *Statistiques et Bilans Energétiques Mondiaux*. Paris, 1990):

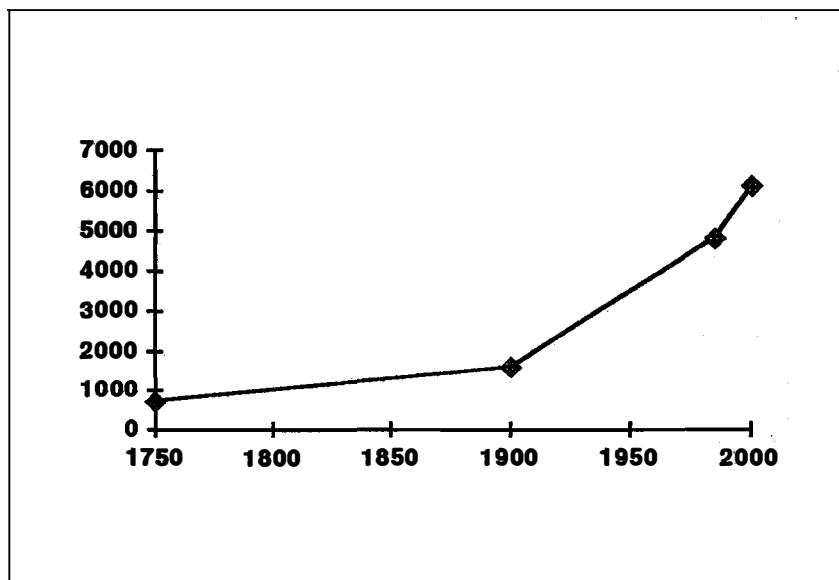
CONSUMO DE ALGUMA MATÉRIAS PRIMAS ENERGÉTICAS

Ano	Petróleo (em Gkg)	Carvão (em Gkg)	Gás natural (em Mtep) ¹	Electricidade (em Mtep)
1971	2395	2129	899	453
1972	2573	2161	943	491
1973	2777	2182	986	528
1974	2730	2192	1008	542
1975	2687	2356	1010	561
1976	2860	2399	1054	602
1977	2972	2494	1096	630
1978	3088	2546	1133	664
1979	3132	2677	1214	693
1980	3101	2726	1228	716
1981	2925	2719	1256	729
1982	2798	2829	1253	737
1983	2781	2827	1265	769
1984	2862	2964	1374	812
1985	2828	3127	1426	847
1986	2958	3206	1462	871
1987	2975	3288	1543	912
1988	3093	3371	1608	950

Destes recursos, o petróleo é aquele cujos gastos mais se têm conseguido controlar nos últimos anos. O consumo dos outros tem vindo a aumentar quase ininterruptamente. Ora as reservas mundiais provadas destas fontes de energia, já com dados de finais de 1992, são relativamente escassas (*BP Statistical Review of World Energy*, Junho de 1993):

RESERVAS DE ALGUMAS MATÉRIAS PRIMAS ENERGÉTICAS EM FINAIS DE 1992

Região	Petróleo (em Gkg)	Carvão (em Gkg)	Gás natural (em Tm ³)
América do Norte	5 000	249 183	7 400
América Latina	17 500	11 430	7 300
Europa da OCDE	2 200	96 924	5 300
Restante Europa	8 100	315 449	55 600
Médio Oriente	89 500	– 62 271 (total)	43 100
África	8 300	de Afr. e M.O.)	9 700
Ásia e Austrália	5 900	303 925	9 500
Total mundial	136 500	1 039 182	138 300



Por outro lado o crescimento da população tem sido avassalador, conforme se pode ver no gráfico, já com a previsão para o ano 2000, que é de 6 116 milhões de habitantes (*International Year Book 1987*, p.9):

Dados recentes apontam para uma procura global de energia, por meados do próximo século, cerca de 4 vezes superior à actual. Mas este valor poderá ser reduzido a metade se tirarmos partido de sistemas eficientes de aproveitamento (Starr, Searl, Alpert, 1992, p.981). Qual a conclusão a tirar destes dados? **As reservas de combustíveis tradicionais são esgotáveis a relativamente curto prazo.**

Em face do exposto, sentimos, pois, a necessidade absoluta de “racionalizar o consumo de energia”, o que significa na prática duas coisas:

- reduzir ao máximo o consumo desses combustíveis (utilizar economicamente o automóvel, as máquinas electrodomésticas e o fogão, isolar os edifícios, dispô-los adequadamente aquando da sua construção. etc);
- recorrer o mais possível à ener-

gia disponível nas fontes alternativas, como sejam o sol, o vento, as marés e a biomassa.

Devemos ter consciência que toda a energia que se utiliza na Terra se fica a dever, em última análise, ao Sol. Este astro irradia $3,9 \cdot 10^{23}$ J de energia para o espaço em cada segundo, mas desta enorme quantidade, apenas a pequeníssima fracção $5/10^{10}$ atinge a Terra. Esta pequeníssima fracção, mesmo assim, ainda corresponde a uma potência de aproximadamente 1370 W que atinge cada metro quadrado da alta atmosfera. Destes 1370 W/m² que atingem a superfície da atmosfera, são retidos apenas 1000 W/m². Com efeito, aproximadamente 37% da energia que incide na atmosfera é reflectida para o espaço exterior (*albedo* da Terra).

Dos 1000 W por metro quadrado que ficam retidos na Terra, apenas cerca de 1/3 atinge a crusta. Esta radiação que atinge a crusta é, em parte, radiação proveniente directamente do Sol, e outra parte é difundida pela atmosfera. Esta energia que atinge a crusta varia ao longo do ano e depende da transparência da atmosfera, da latitude e da altitude. Em Portugal metropolitano, num dia quente de Verão, calcula-se que a energia recebida em cada segundo pela crusta é aproximadamente 315 J por cada metro quadrado (Bartels e Angenheister, 1970). A crusta não absorve toda a radiação que nela incide. A neve, a areia, as charnecas, os prados, os bosques e o mar reflectem essa radiação. Mas mesmo assim, a energia que atinge a crusta terrestre, se fosse convenientemente aproveitada, sobriaria largamente para as necessidades, já que

constitui 10 000 vezes as necessidades do consumo mundial das actividades humanas. Mas, infelizmente, só uma percentagem insignificante desta energia é actualmente aproveitada de um modo directo. Esse aproveitamento directo da energia solar faz-se por dois processos essenciais, que constituem outros tantos ramos da investigação actual em aproveitamento da energia solar:

- por *conversão térmica* em sistemas activos (colectores solares) e passivos (estufas, casas solares, etc),
- por *conversão eléctrica* (nos painéis fotovoltaicos).

A parte restante da radiação tem as seguintes finalidades: a *fotosíntese*, que inicia os ciclos da matéria orgânica e da energia; a *evaporação da água*, que inicia o ciclo hidrológico:

- a *criação de diferenças de temperatura atmosférica* geradores do vento, o qual, em interacção com a hidrosfera vai transportar o vapor de água e gerar as ondas e as correntes marítimas;
- a *emissão de radiação térmica*, bem como a *transformação em biomassa e em jazigos de combustíveis fósseis*, sendo este o destino final temporalmente longínquo da radiação solar.

Se o aproveitamento artificial pelo homem da energia solar é muito pequeno, o aproveitamento natural pelos seres vivos também o é. Sabemos que os fótons solares fornecem energia fundamental para que as plantas verdes, por fotossíntese, criem os seus alimentos. Mas essas plantas convertem apenas 0,5% da energia solar que recebem em matéria orgânica. Os herbívoros aproveitam apenas 17% da matéria vegetal na sua alimentação. E os carnívoros, ao alimentarem-se dos herbívoros, apenas aproveitam 4,4% da sua matéria. Os animais e plantas, ao morrerem, acabam por originar, por decomposição, os nutrientes que irão servir de alimento a outras plantas. A decomposição anaeróbia acaba por originar, ao fim de muitos milhares de anos, os combustíveis fósseis. Estes, no fundo, acabam por ser os depósitos da energia que, há muitos milhões de anos, foi emitida pelo Sol para a Terra.

O ciclo de transferências de energia na biosfera é um ciclo aberto, pois requiere que seja transferida energia do Sol para as plantas verdes, únicas aproveitadoras da energia fotónica para sintetizar a matéria orgânica. E trata-se, de facto, de um ciclo muito pouco eficiente do ponto de vista energético.

Sem a energia vinda do Sol também não haveria gradientes de temperatura atmosférica que estão na origem dos ventos cuja energia se explora. As quedas de água, de onde tanta energia se aproveita, fazem parte de um ciclo em que também desempenha papel fundamental a energia proveniente do Sol. A energia proveniente do Sol é, pois, imprescindível para a vida no planeta Terra. Mas este desaproveita-a em altíssimo grau...

4. ENERGIA, UM CONCEITO A CONSTRUIR

“É importante compreender que, na física actual, não temos conhecimento do que é a energia”. Esta afirmação é de um dos maiores físicos do nosso século. Richard Feynman. De facto, o conceito de energia é um conceito altamente abstracto, abrangente e diferenciado, que tem imediatamente subordinado a ele conceitos como o de forma fundamental de energia, transformação de energia, transferência de energia conservação de energia e degradação de energia. Há muitos modos de conceptualizar esse conceito (Duit, 1985, p. 68) e é impossível, quanto a nós, apresentar uma definição que satisfaça em absoluto. A conhecida definição de Rankine, “energia é a capacidade de realizar trabalho”, ainda que seja a menos má revela-se restritiva e enganadora. Restritiva porque associa por demais a energia à produção de trabalho, dando uma imagem mecanicista e pouco abrangente da energia. Enganadora, porque sabemos bem que nos processos espontâneos a energia conserva-se mas não se conser-

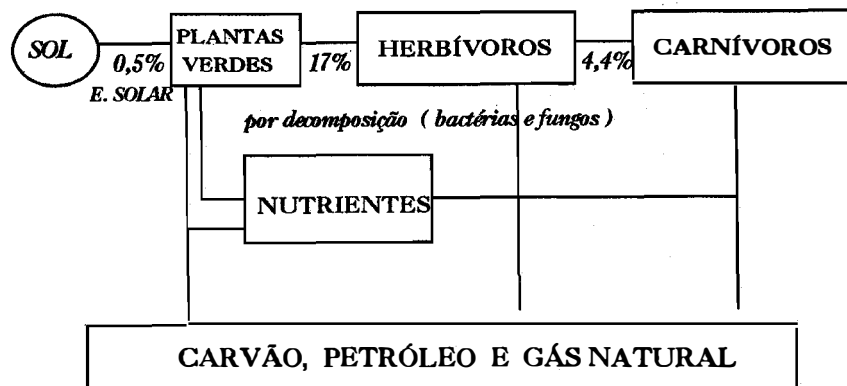
va “a capacidade de realizar trabalho”.

Se é impossível afirmarmos, com toda a necessária abrangência o que a energia é, já se torna fácil afirmar aquilo que ela não é. Assim, e de modo sucinto, poderemos afirmar que (ao contrário do que muita gente pensa) a energia **não é**:

- uma força movente nem qualquer outro tipo de força;
- algo que esteja obrigatoriamente associada aos seres vivos e particularmente ao homem;
- a causa dos movimentos ou outros quaisquer fenómenos que ocorrem;
- nenhum combustível seja ele o carvão, o petróleo, ou qualquer outro; nenhum alimento, seja este mais ou;
- menos “calórico”;
- um fluido em repouso ou em movimento, seja ele uma queda de água ou ar em movimento;
- um reagente ou produto de reacções químicas;
- uma máquina ou qualquer outro mecanismo concreto.

A energia é uma quantidade que intervém em todos os fenómenos do Universo, e está associada às duas grandes realidades que nele existem: matéria e radiação. Um pedaço de matéria ou um feixe de radiação são “coisas” com determinadas propriedades que os caracterizam e distinguem. Uma dessas propriedades é a energia. Esta não se pode identificar nem com o pedaço de matéria nem com o feixe de radiação. Alguém identificaria um pedaço de água do mar com a sua densidade?

Há diversas estratégias para o ensino da energia que põem ênfase em aspectos diferentes: umas são mais *conceptuais-analíticas*, com a tónica nos



conceitos e formalismos; outras são mais *fenomenológicas* com os alunos em intensa interacção com os fenómenos, reais e provocados: outras, ainda, são fundamentalmente *utilitárias* com um tratamento predominante numa perspectiva industrial e económica; e, finalmente, há as abordagens *sociais* com ênfase na interacção ciência-tecnologia-sociedade (Driver e Millar, 1985, pp. 16-21). Mas, em todas elas, o conceito de energia irá sendo construído por cada aluno, com muitas hesitações e imprecisões. É muito difícil aos alunos, com toda a informação que recebem diariamente acerca da energia, encararem essa grandeza como uma simples quantidade mensurável, que se conserva em todas as transformações. Veem-na preferencialmente como um mecanismo, uma substância, um fluido ou qualquer outro ente corpóreo que se gasta, e que é a causa das coisas acontecerem.

5. A CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

A ideia actual de que a *energia* é um *invariante matemático nos sistemas isolados* levou muito tempo a ser fundamentada e passou, sem dúvida, pela descoberta de que se trata de uma *grandeza que é multi-facetada isto é manifesta-se nos mais variados fenómenos da natureza*. Os cientistas aprenderam a medir as variações da energia de um sistema, servindo-se de relações que envolvem quantidades efectivamente mensuráveis como velocidades, distâncias, forças, cargas eléctricas, etc. E verificaram, ou melhor induziram a partir da experiência que, quando um sistema passa por uma série de transformações, não há criação ou destruição de energia. Se o sistema está *isolado* a soma total das variações de energia que sofre é zero, e portanto a *energia interna mantém-se*. Se o sistema não está *isolado* então a soma total das variações da sua energia interna é igual à energia total que o sistema troca com o exterior.

Para ilustrar o significado de energia, e ao mesmo tempo revelar o carácter tautológico da lei da conservação da energia, Feynman recorre a uma alegoria reveladora da sua criatividade (1971, pp. 4.1-4.2):

A mãe de *Daniel*, o travesso oferece-lhe 28 blocos indestrutíveis para brincar e, dia após dia, por mais que ele pretenda esconder alguns dos blocos, a mãe acaba sempre por descobrir o seu

número, quer eles estejam fechados numa caixa, escondidos na água suja de um tanque, ou ocultos de qualquer outro modo. E verifica que a quantidade de blocos permanece invariante. Com o aumento gradual da complexidade das “brincadeiras” do Daniel, vai surgindo a necessidade de introduzir termos abstractos para determinar a quantidade total de blocos, termos esses que envolvem grandezas mensuráveis como massas de caixas, volumes de água, etc.

Ora a natureza, no que respeita à energia, comporta-se de modo muito semelhante, ainda que de forma mais abstracta já que a energia não é corpórea, não é formada por blocos materiais. Recomendamos vivamente a exploração didáctica desta alegoria de Feynman.

O princípio da conservação da energia serve de referencial ao estudo dos mais diversos fenómenos. Por exemplo, com base nele é possível deduzir-se muito facilmente as equações dos circuitos eléctricos, estudar-se o comportamento termoquímico dos sistemas, estudarem-se as condições de equilíbrio nas máquinas simples, etc. É importante que a aprendizagem proporcionada aos alunos dê esta ideia de coerência e integridade das ciências físicas.

Defendemos, pois, que, para além dos circuitos eléctricos, muitos outros temas sejam tratados tendo por referencial esse conceito unificador e abrangente que é a energia. Os alunos deverão tomar consciência de que muitos resultados que estabelecem (ou deviam estabelecer...) experimentalmente não são mais do que corolários dessa afirmação muito geral que é o princípio da conservação da energia.

O trabalho e o calor deverão ser encarados como grandezas que medem a energia transferida através das fronteiras dos sistemas. No que respeita à grandeza trabalho realizado por uma força que actua num corpo, logo a seguir à sua definição,

$$W = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

deverá vir a sua relação com a variação da energia que, por si só, provoca no corpo:

$$W = \Delta E$$

Só com uma atenção permanente à lei da conservação da energia será possível contrariar-se a tendência para incorrecções que aparecem em livros de texto

(Bauman, 1992, p.264) e em que professores e alunos acabam por cair. Bauman refere o exemplo da *lei do trabalho-energia* que aparece muitas vezes enunciada na forma: “o trabalho realizado num corpo é igual a variação da sua energia cinética”.

Se substituirmos a palavra *corpo* pela palavra *partícula*, a afirmação está correcta. Tal como ela está escrita, é incorrecta, pois o trabalho realizado pelas forças exteriores que actuam num corpo é igual à variação total da energia que, por si só, provoca no corpo (incluindo a variação da sua energia interna), e não, necessariamente, à variação apenas da sua energia cinética. Aliás um simples exemplo serve para mostrar a incorrecção: no choque de uma bola de plástico com uma parede, o trabalho das forças exteriores é nulo (não deslocam o seu ponto de aplicação pois a parede não se desloca) e a velocidade do corpo reduz-se a zero, isto é, tem-se

$$W = 0 \text{ e } \Delta E_c < 0, \text{ portanto } W \neq \Delta E_c$$

Também devemos ter consciência do carácter claramente tautológico do princípio da conservação da energia. A fé neste princípio é tal que, sempre que parece estar a ser violado, logo se inventa uma nova porção de matéria ou energia para justificar a energia em falta. Assim sucedeu quando Pauli, em 1931 sugeriu a existência do neutrino, para compatibilizar o declínio β com o princípio da conservação da energia. Só mais tarde a existência desta partícula viria a ser comprovada experimentalmente.

Analisemos, a terminar, a lei da conservação da energia nos casos em que há uma variação significativa na energia de massa (Valadares, 1993).

Consideremos uma reacção nuclear em que, por exemplo, a soma das massas dos produtos é inferior à soma das massas dos reagentes. O “deficit de massa”, Δm , dá lugar à libertação de uma energia Δmc^2 . O que se costuma afirmar é que “a massa foi convertida em energia”. Mas tal afirmação é confusa para não dizer incorrecta. De facto, de acordo com Einstein,

“a massa inercial de um sistema de corpos deve ser encarada precisamente como uma medida da sua energia”. (1984, p.45).

e

“massa e energia são essencialmente idênticas: elas são apenas expres-

sões diferentes da mesma entidade". (1958, p.61).

Então imaginemos que a reacção ocorre dentro de paredes perfeitamente isoladoras que retêm os fótons e outras radiações quaisquer que se libertem. A *energia do sistema*, assim *isolado*, *não varia* pela lei da conservação da energia. logo a *massa* do sistema, que lhe é equivalente, *também não varia*. Se uma e outra não variam, como pode haver conversão de uma noutra?! Nem a energia equivalente à soma das massas das partículas do sistema, nem a soma das energias cinéticas das partículas, se mantiveram invariáveis (como, aliás, não se mantêm em geral nas interacções). A parte do conteúdo de energia do sistema correspondente às partículas diminuiu. Mas em compensação apareceu uma parte do conteúdo energético do sistema na forma de radiação. A massa-energia total é sempre a mesma, só que está desigualmente repartida antes e após a reacção.

Se definirmos o sistema de outro modo (apenas as partículas e não a radiação emitida) então a radiação é perdida para o exterior e o **sistema não está isolado**. Neste caso a massa diminui, e portanto a energia de massa, e também diminui o conteúdo de energia do sistema. Não se trata de transformação de massa em energia, mas variações paralelas dessas duas grandezas equivalentes.

De acordo com o princípio da conservação da energia, *num sistema isolado de corpos a energia é um invariante no tempo*. Ora, como a energia e a massa são duas grandezas absolutamente equivalentes, "as duas faces de uma mesma moeda", a conclusão que há que tirar é a de que *a massa nos sistemas isolados é também um invariante no tempo*. Podemos, pois, afirmar citando Einstein, que

"o postulado da conservação da massa de um sistema coincide com o da conservação da energia e só é válido na medida em que o sistema não absorve nem emite energia" (1984, p. 45).

Não há conversões de matéria, em energia ou de energia em matéria como tantas vezes se ouve referir, por exemplo nas reacções de "materialização" ou de "desmaterialização" (Baierlein, 1991). Se tal sucedesse, estaríamos perante o facto insólito de corpos, "coisas" reais existentes (matéria), se converterem num atributo ou propriedade (energia), que é uma entidade abstracta, um "constructo" da

mente humana, e não nos deveríamos espantar, por exemplo, se víssemos água do mar a converter-se em densidade.

6. A DEGRADAÇÃO DA ENERGIA

A exemplo do que sucedeu com a ideia de conservação de energia, a de *degradação de energia* também levou muito tempo a construir-se. Podemos afirmar que a sua história remonta aos tempos em que o homem começou a aproveitar as mais diversas máquinas para a realização de trabalho útil, particularmente a máquina a vapor. Recomendamos a leitura bastante formativa dessa história, para iniciarmos o domínio do importante conceito de *degradação da energia*.

Vamos tentar alinhar algumas conclusões a que os físicos chegaram acerca da energia:

1ª — *Em todos os processos que naturalmente ocorrem na natureza, uma dada quantidade de energia vai-se dissipando* isto é, espalhando cada vez por maior número de partículas. Assim, por exemplo, a energia dos fótons que atingem as plantas com clorofila que existem num prado vai-se sucessivamente espalhando pelas moléculas dessas plantas e pelo ar, pelas moléculas dos animais que pastam nesse prado, pelos animais que se alimentam desses animais, pela Terra, quando todos estes seres vivos morrem, e novamente pela atmosfera devido aos gases de putrefacção, etc.

2ª — *Sempre que se produz um certo trabalho, por pequeno que seja ocorre em geral uma grande dissipação de energia*. Um exemplo: sempre que da energia de algumas moléculas de gasolina e oxigénio que penetram nos cilindros de um automóvel, se produz um certo trabalho, exercido na cambota, há um aquecimento enorme do material do motor e do ar circundante, o qual é devido à dissipação de energia através das inúmeras moléculas que constituem esses corpos.

3ª — *A energia mecânica é convertível integralmente em calor mas o calor jamais é reconvertido integralmente em energia mecânica*. Para retransformar este calor em energia mecânica há que fornecer o calor à fonte quente de uma máquina térmica (a caldeira no caso da máquina a vapor, o cilindro no caso do automóvel). Este tipo de máquina.

porém, nunca apresenta um rendimento de 100%, isto é, nunca é capaz de transformar todo o calor em energia mecânica. Uma grande parte do calor é transferido para uma fonte fria (o condensador, quando existe, ou a atmosfera). Por exemplo, nas primitivas máquinas a vapor só cerca de 9% do calor era transformado em energia mecânica, o restante aquecia a máquina e o ar (grande dissipação de energia!) Hoje um rendimento de 40% já é considerado muito bom.

4ª — *A energia quando concentrada produz efeitos que não são possíveis quando em igual ou mesmo maior quantidade se encontra dissipada*. Assim, por exemplo, quando se fornece uma certa energia à água de um tanque até ela ficar tépida e se introduz nele um ovo, este não consegue ser cozido. Porém, se concentrarmos a mesma energia fornecida à água do tanque em um ou dois decilitros de água contidos numa panela (fornecendo o mesmo calor as duas quantidades de água) já conseguimos cozer o ovo.

5ª — *Há um sentido para os fenómenos espontâneos do ponto de vista das transferências de energia*. Assim, já todos observámos, por exemplo, um copo de vidro cair ao chão e estilhaçar-se. A energia potencial gravítica converte-se em energia cinética do copo durante a queda. No momento do impacto com o solo, a energia transfere-se para os estilhaços e para o ar circundante, *dissipando-se* deste modo.

Mas já alguém viu o "filme ao contrário" isto é, acontecer espontaneamente o fenómeno inverso? E note-se que este fenómeno inverso não é teoricamente impossível no quadro da conservação da energia. Com efeito, imaginemos esse fenómeno inverso a ocorrer, os pedaços de vidro a concentrarem-se novamente no local de queda, a reconstituírem o copo, toda a energia que se tinha espalhado a concentrar-se novamente no copo na forma cinética, e o copo a subir novamente até ao ponto de onde caiu, com uma reposição da energia potencial inicial a partir da energia cinética. Se este fenómeno inverso ocorresse, não teríamos uma cadeia de transferências de energia oposta, e, portanto sempre com a mesma energia total? A lei da conservação da energia continuaria válida! Então por que motivo esse fenómeno inverso nunca se observou?

Durante muito tempo pensou-se que era a energia a grandeza responsável por

os fenómenos ocorrerem espontaneamente no sentido em que ocorrem, e não no sentido oposto. Alguns cientistas chegaram mesmo a afirmar que um sistema evolui espontaneamente no sentido em que a sua energia diminui. Segundo esta ideia, os regatos descem espontaneamente as montanhas porque assim é libertada energia, as reacções ocorrem espontaneamente no sentido em que se liberta calor, etc. Mas, já há muito se verificou que este critério é falso. Há processos espontâneos que são endoenergéticos (são exemplos a evaporação da água e a reacção do hidrogénio com o iodo para dar iodeto de hidrogénio, entre muitos outros).

O critério de espontaneidade dos fenómenos não tem que ver com a energia, mas, sim, com uma outra grandeza fundamental chamada *entropia*.

Foi Clausius quem introduziu esta grandeza e mostrou que, se um sistema evolui de um estado 1 para um estado 2, então a variação da entropia é ΔS tal que

$$\Delta S \geq \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

Desta desigualdade de Clausius conclui-se, imediatamente, que nos sistemas isolados ($dQ = 0$) a variação de entropia só pode ser positiva ou nula

$$\Delta S \geq 0$$

isto é, *quando um sistema isolado evolui, a entropia do seu estado final nunca pode ser menor do que a do seu estado inicial.*

Esta lei determina precisamente o sentido da evolução espontânea dos sistemas isolados que é o do aumento da sua entropia que acompanha as transformações irreversíveis que nele ocorrem.

O facto de o critério de espontaneidade nas transformações de um sistema isolado ser o aumento da sua entropia não significa que esse critério seja válido para os sistemas não isolados. Um sistema (S) que evolui trocando energia com o seu ambiente (A) pode sofrer transformações espontâneas com diminuição da sua entropia. Isto passa-se, por exemplo, na formação espontânea de cristais numa solução. A espontaneidade do processo não requiere que a entropia do sistema, ΔS_s , aumente mas, sim, que a entropia do universo do sistema, ΔS_u , aumente. Há muitos casos análogos ao da cristalização, em que se tem

$$\Delta S_u = \Delta S_s + \Delta S_A > 0$$

ainda que seja $\Delta S_s < 0$

Os sistemas isolados evoluem no sentido do aumento da entropia que é, também, o sentido dos estados mais prováveis. A mecânica estatística tornou possível associar a qualquer estado termodinâmico (macroscópico) de um sistema (definido por um pequeno número de variáveis de estado como a pressão e a temperatura, por exemplo) uma probabilidade, π , que está relacionada com o número de estados dinâmicos (microscópicos) correspondentes (dependentes das posições e movimentos de todas as partículas que constituem o sistema). E Boltzmann estabeleceu a seguinte relação entre a **entropia** de cada estado (propriedade termodinâmica já anteriormente definida por Clausius) e a respectiva probabilidade:

$$S = k_B \ln \pi$$

(k_B é a constante de Boltzmann)

O estado inicial do sistema copo-Terra-ar ambiente (quando o copo está inteiro, a uma dada altura do solo) é muito menos provável, e portanto tem menor entropia, do que o estado do mesmo sistema quando o copo está estilhaçado no chão. Neste estado final mais provável, e portanto de maior entropia a energia encontra-se dissipada e mais desordenada. Se no estado inicial era possível realizar algum trabalho útil (por exemplo, levantar um corpo leve ligando-o ao copo por um fio passando por uma roldana fixa), no estado final a capacidade de realizar trabalho diminuiu.

Em resumo, a **entropia** é uma grandeza muito importante que:

- *mede a probabilidade de ocorrência dos estados de um sistema;*
- *quantifica a dispersão da energia total;*
- *taduz a capacidade de se realizar trabalho útil a partir da energia do sistema.*

Um sistema isolado evolui espontaneamente de modo a que a energia se vá mantendo constante, mas esse sistema vá passando por estados cada vez mais prováveis e, portanto, de maior entropia. A energia no sistema vai-se dissipando, a entropia vai aumentando, e cada vez é menor a probabilidade de se realizar trabalho útil a partir dessa energia.

Num sistema não isolado, acontece o mesmo com o universo do sistema (sistema mais ambiente).

Quando, para concretizar, uma central termoelectrica concentra uma

certa porção de energia nas cargas que constituem a corrente eléctrica que fornece, *dissipa* na realidade, uma muito maior quantidade de energia na atmosfera. Ocorre, pois, uma nítida *dissipação da energia* global consumida pela central, a que Tait chamou **degradação da energia** e que é acompanhada pelo aumento da entropia do universo.

O facto de ocorrer degradação da energia na central não significa que a energia foi consumida ou gasta. Assim, a energia proveniente da combustão, após uma série de transferências a que ficou sujeita, acabou por se manter invariante no final destas. Porém, encontra-se em grande parte dispersa e desordenada já que foi aquecer os fumos, o ar atmosférico, as paredes dos materiais, etc. (a esta energia desorganizada ou desordenada Brunhes chamava *energia sem valor*).

Apenas uma pequena parte da energia transferida pela central fica concentrada e ordenada nos electrões dos fios eléctricos (a esta energia Brunhes chamava *energia-riqueza*). É esta que, posteriormente, vai ser aproveitada para a realização de trabalho ou para posterior degradação (por exemplo em aquecimento dos fios). Considerando todo o universo da central, poderemos afirmar que a entropia deste aumenta à medida que a central vai funcionando.

A degradação ocorre porque a entropia aumenta e, com ela, a quantidade de energia dispersa e desordenada com menor capacidade de produzir trabalho útil. E isso deve-se à irreversibilidade das transformações naturais...

7. A ENERGIA E A SOCIEDADE

A ciência e a tecnologia forneceu à humanidade meios extraordinários de bem-estar, desde os meios de transporte até aos meios de comunicação, desde os sistemas de iluminação até aos de aquecimento. etc. Porém, também lhe proporcionou meios poderosos de auto-destruição. Quer nuns quer noutros, a energia não podia deixar de estar no cerne. Graças a ela, ocorrem grandes transformações na superfície terrestre. Uma das mais perigosas tem que ver com a composição da própria atmosfera.

Todas as transferências naturais de energia conduzem a um equilíbrio entre a radiação solar absorvida pela Terra e a emitida para o espaço exterior. A existên-

cia na atmosfera terrestre de determinados gases produz um efeito de estufa que impede que determinadas radiações sejam reenviadas para o espaço, mantendo-se assim a temperatura da superfície da Terra. Sem a presença desses gases, a temperatura média da superfície terrestre seria inferior em cerca de 30°C ao que é actualmente. A contribuição dos diferentes gases para o efeito de estufa constam da figura seguinte (*Physics*

rio catástrofico que corresponderia à subida da temperatura global do globo acima de um valor crítico, se a concentração dos gases do efeito de estufa subisse acima de determinados valores. Mas há que consciencializar o ser humano para o facto de o seu domínio da energia ter alterado o seu poder. Exige-se uma cultura diferente, adequada à época em que vivemos, capaz de responsabilizar cada ser humano pela conserva-

CONCLUSÃO

A energia é uma grandeza abstracta de que os alunos ouvem falar permanentemente de um modo bastante concreto. A linguagem do dia a dia traduz algumas concepções incorrectas acerca da energia que foram tratadas num anterior artigo do mesmo autor. Essas concepções incorrectas têm origem histórica e, do mesmo modo que a ciência teve dificuldade em as clarificar, também os alunos apresentam grandes dificuldades em as debelar.

Muitas vezes as estratégias e a linguagem adoptadas nas aulas, principalmente nos primeiros anos de escolaridade, em vez de contribuírem para a mudança conceptual que se pretende, ainda acabam por reforçar essas concepções incorrectas. Este artigo procura exemplificar algumas abordagens possíveis bem como o tipo de linguagem a adoptar, além de reforçar aspectos hoje considerados fundamentais no ensino da ciência como sejam os que têm que ver com a interacção ciência-tecnologia-sociedade.

* Universidade Aberta

Av. Duque d'Ávila, 1993 - 8º - 1000 Lisboa

	CO ₂	CH ₄	NO	CFC ₁₁	CFC ₁₂
Potencial relativo de aquecimento global	1	21	290	3900	7300
Concentração atmosférica média (ppm) em 1988	350	1.7	0.31	0.00036	0.00044
taxa de aumento em 1990	0.4	1	0.3	5	4

Contribuição de alguns gases para o efeito de estufa

Education, vol. 27, nº 4, 1992).

A quantidade de dióxido de carbono na atmosfera tem vindo a crescer, em virtude do funcionamento das fábricas, dos carros, etc. De 280 p.p.m. (por milhão) no século transacto, passou a cerca de 340 p.p.m. actualmente. Esta alteração da composição da atmosfera poderá implicar uma alteração perigosa no efeito de estufa.

Dados recentemente divulgados numa exposição sobre o *aquecimento global* no Museu Americano de História Natural, em Nova Iorque, mostram que desde 1880 até 1987 se verificou uma subida da temperatura média do globo de 0,5°C (Revkin, 1992, p.60).

Ainda não está demonstrado, de forma inequívoca, que o aumento das concentrações dos gases do efeito de estufa estão a produzir um aumento de temperatura (*Physics Education*, vol. 27, nº 4, 1992, p. 196). Mas é um facto que seis dos mais quentes anos, desde que há registos de temperaturas, são posteriores a 1980.

Não cabe aqui apresentar um cená-

ção da "aldeia" de todos, capaz de consciencializar para o facto de a energia estar na base do perigo, quer de um holocausto nuclear, quer de uma destruição ecológica do nosso planeta, para não falar de outros perigos. Se, felizmente, no primeiro aspecto, a situação parece ter melhorado nestes últimos anos, o mesmo não se pode dizer a respeito dos outros perigos. Os poluentes lançados na atmosfera pelas fábricas (e não só), o dióxido de carbono, CO₂, o dióxido de enxofre, SO₂, os óxidos de azoto, NO_x, etc. poderão produzir o aquecimento global do planeta, a destruição da camada de ozono e as chuvas ácidas. Estes são alguns dos problemas relacionados com a energia que devem preocupar qualquer cidadão culto, já que está em risco a sua saúde e a dos restantes seres vivos e até mesmo a sobrevivência da raça humana. Por isso, tais temas não poderão deixar de ser debatidos num ensino que se pretende focado na interacção ciência-tecnologia-sociedade, e tendo como meta a preparação de cidadãos responsáveis.

¹ A tep (tonelada equivalente de petróleo) é uma unidade definida convencionalmente como sendo igual a 10 gigacalorias, que é aproximadamente a energia que corresponde a uma tonelada de petróleo (in *Dicionário de Terminologia Energética* da Associação Portuguesa de Energia, 2ª ed., 1992).

BIBLIOGRAFIA

- C. Adkins, *An introduction to Thermal Physics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1987.
- G. Alcaine, *Rev. Esp. Fis.* 3 (1) (1989) 59-62.
- J. Bartels, G. Angenheister, *Geofísica*, Ed. Meridiano, Lisboa, 1970.
- P. Black, J. Solomon, *Life-world and science world - pupils' ideas about energy*, Entropy in the School, Vol. 1, Roland Eotvos Physical Society, Budapest, 1983.
- J. Bliss, J. Ogborn, *Eur. J. Sci. Educ.* 7 (1985) 195-203.
- A. Brook, *Children's understanding of ideas about energy: a review of the literature*, Energy Matters (proceedings of an Invited Conference), University of Leeds, 1985.
- A. Brook, R. Driver, Driver and Millar (Editores),

Aspects of secondary students' understanding of energy, Children's Learning in Science Project, University of Leeds, 1984.

B. Brunhes, *La Dégradation de l'Energie*, Ed. Flammarion, 1908.

D. Chisholm, *Phys. Educ.* **27** (1992) 215-220.

R. Driver, R. Millar, *Teaching energy in schools: towards an analysis of curriculum approaches*, Energy Matters (proceedings of an Invited Conference), University of Leeds, 1985.

R. Duit, *In search of an energy concept*, Energy Matters (proceedings of an Invited Conference), University of Leeds, 1985.

R. Duit, *Physics Education* **19** (1984) 59-66.

A. Einstein, *A inércia de um corpo será dependente do seu conteúdo energético?*, Textos Fundamentais da Física Moderna, 1º Vol.- O Princípio da Relatividade, F. Calouste Gulbenkian, pp. 87-90, 1972.

A. Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, Alianza Editorial, Madrid, pp. 42-46, 1984.

A. Favieres et al., *Una introducción al concepto de energía basada en las ideas previas de los estudiantes*, Comunicação OR-25 do 1º Encontro Ibérico sobre o Ensino da Física, Valladolid, 1991.

R. Feynman, *The Feynman Lectures of Physics*,

Ed. Fondo Educativo Interamericano, S.A., Vol. 1- Mecânica, radiação e calor, Bogota, pp. 4-1 a 4-12, 1971.

R. Feynman, *O que é uma lei física?*, Ed. Gradiva, Lisboa, 1989.

E. Fermi, *Termodinâmica*, Ed Almedina, Coimbra, pp. 28-58, 1973.

F. Fernandes, *Bol. Soc. Port. Quim.* **6** (1981) 4.

C. Gayford, *Eur. J. Sci. Ed.* **8** (1986) 443-450.

P. Gailiunas, *Sch. Sci. Rev.* (1988) 587-590.

J. Gilbert, M. Pope, *Res. Sci. Tech. Ed.* **4** (1986) 61-76.

S. Mak, S. K. Young, *Sch. Sci. Rev.* (1987) 464-470.

J. Marion, J. Hornyak, *General Physics with Bioscience Essays*, Ed. John Wiley & Sons, New York, 1985.

J. Ogborn, *Sch. Sci. Rev.* (1986).

J. Ogborn, *Sch. Sci. Rev.* (1990).

E. Okuno, I. Caldas, C. Chow, *Física para Ciências Biológicas e Biomédicas*, Harbra Ed., São Paulo, 1982.

T. Russel, H. Munley, Robin Millar (Editor), *Science as a discipline, science as seen by stu-*

dents and teachers' professional knowledge, in *Doing science: images of science in Science Education*, ed., The Falmer Press, London, 1989.

F. Selleri, *O que é a energia*, Edit. Notícias, Lisboa, s/d

R. Sexl, *Eur. J. Sci. Ed.* **3** (1981) 285-289,

J. Skea, *Energy and environment*, *Phys. Educ.* **27** (1992) 193-197

J. Solomon, *Eur. J. Sci. Ed.* **5** (1983) 49-59.

B. Stead, *Energy, Learning in Science Project*, University of Waikato, New Zealand, 1980.

M. Summers, *Sch. Sci. Rev.* (1983) 670-76.

K. Taber, *Sch. Sci. Rev.* (1989) 57-62.

R. Trumper, *International Journal of Science Education* **12** (1990) 343-354.

J. Valadares, D. Pereira, *Didáctica da Física e da Química*, Universidade Aberta, Volumes 1 e 2, Lisboa, pp.48-49 e 141-164, 1991.

J. Valadares, *Gaz. Fis.* **16-1** (1993) 9-14.

J. Warren, *Eur. J. Sci. Ed.* **4** (1982) 295-297.

D. Watts, *Phys. Educ.* **18** (1983) 213-217.

D. Watts, J. Gilbert, *Stud. Sci. Ed.* **10** (1983) 61-98.

M. Zemansky, *The Physics Teacher* (1970).

