

Contribuições para a dinâmica geomorfológica

Associação Portuguesa de Geomorfólogos - Volume I
Com a colaboração do Centro de Estudos Geográficos



Lisboa - 2002

Título: Contribuições para a Dinâmica Geomorfológica

Editor: Associação Portuguesa de Geomorfólogos (APGeom)

Comissão Redatorial: Catarina Ramos (coordenação), Jorge Trindade, Mário Neves,
Gonçalo Rocha

Execução gráfica: David Barreira

Capa: António Eanes

Tiragem: 250 exemplares

ISBN: 972-636-137-0

Lisboa, Dezembro de 2002

Associação Portuguesa de Geomorfólogos
Centro de Estudos Geográficos, Fac. Letras, Alameda da Universidade
1600-214 Lisboa – Portugal
Tel: 217940218 Fax: 217938690 E-mail: geomorf@ceg.ul.pt

Edição subsidiada pelo Fundo de Apoio à Comunidade Científica da

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR

Portugal

Edição patrocinada pelo



Desenvolvimento de um modelo para avaliação da capacidade erosiva da ondulação em litorais rochosos

M. Neves*, A. Ramos Pereira**, J. Trindade***

Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa

M. M. Laranjeira****

Secção de Geografia, Universidade do Minho

Resumo: A erosão no sopé das arribas é, em grande medida, condicionada por duas forças que se opõem: a força de resistência mecânica das rochas que as compõem e a força erosiva das ondas que as atingem. Com o objectivo de estimar essas duas forças foi desenvolvido um modelo que combina diversas fórmulas criadas e testadas por outros autores. Foi seleccionado um sector de arriba localizado na faixa litoral a oeste de Cascais com características geomorfológicas particulares para exemplificar e testar a aplicação do modelo. *Palavras-chave:* Litoral rochoso, modelo de erosão, força de resistência das rochas, força erosiva das ondas, Estremadura portuguesa.

Abstract: *Development of a model to evaluate wave erosion in rock coasts.* Erosion at the cliffs base is controlled mainly by two opposite forces: the assailing force of waves that reach the cliff base and the local rock strength. The evaluation of those two forces is essential to understand the present morphology and dynamic of each rock coast sector in order to forecast its evolution. A methodology that enables the calculation of those two forces is proposed. To estimate the wave force at the cliff base we combine formulas developed or stated by several authors. Knowing wavelength, wave height, wave period, slope of the internal continental shelf and the water depth at the cliff base the model give us water depth at the breaking point, the type of wave at the cliff base and above all, the pressure (along with its spatial distribution) applied there by the waves. In the proposed model, the mechanical strength of the cliff base intact rocks is evaluated using its most representative parameter, the uniaxial (or unconfined) compressive strength. Among the factors that can reduce this strength, the existence of discontinuities is generally recognized as being the most important. To calculate the rock mass strength including the influence of discontinuities, the model use the Rock Mass index (RMi) developed by Palmström (1996, a, b). The RMi combines the uniaxial compressive strength of intact rock with the analysis of the joints roughness, alteration, size, termination and density. The model was applied to a rock coast sector located near Cascais (Lisbon). The studied area is exposed to SW and the cliff is cut in cretaceous rocks. Wave data comes from the nearest wave gauge offshore Sines. The results of the model allow us to conclude that deep-water waves with heights above 4,3m had enough erosive force to shape the present local morphology exploring the weakness of a clay marl outcrop. However, the gradual cliff top retreat with the resulting formation of a sub-structural shore platform, enable other processes, mainly sub-aerial, to increase their importance. A storm situation that took place in December 2000 was followed in detail and gave essential elements to complete the results obtained by the model. Therefore, it is concluded that nowadays, the clay marl outcrop suffers a combination of permanent erosion due to subsurface drainage in a high frequency but low magnitude process with a discontinuous attack by the storm waves in a low frequency but high magnitude process. **Keywords:** Rock coast, erosion model, rock strength, wave assailing force, Portuguese Estremadura.

1. OBJECTIVOS

Os factores que condicionam a evolução dos litorais rochosos são múltiplos, com peso variável de local para local e, de uma forma qualitativa, já foram identificados por vários autores encontrando-se expressos em Neves (1995). No entanto, investigadores desta área científica, entre os quais Sunamura (1992), Marques (1997) e Tsujimoto (1987), concordam em que a dinâmica da faixa que corresponde ao sopé das arribas (sector atingido pela ondulação) é, em primeiro lugar, condicionada por duas

* Centro de Estudos Geográficos – Linha de Investigação DILIF (Dinâmica Litoral e Fluvial) – Fac. Letras. Alameda da Universidade. 1600-214 Lisboa. PORTUGAL. E-mail: mario.neves@ceg.ul.pt

** E-mail: anarp@mail.doc.fl.ul.pt

*** E-mail: jorgetrd@univ-ab.pt

**** E-mail: manela_laranjeira@yahoo.com

forças que se opõem: a força erosiva das ondas (F_w) e a força de resistência mecânica das rochas, mais ou menos modificada pelos diversos padrões de descontinuidades (F_r). Sempre que a “força assaltante” (como a designa Sunamura, 1992, p.85) das ondas excede a resistência do material em que estão talhados os litorais rochosos, ocorre erosão.

Deste modo, a determinação destas duas forças é essencial, não somente para compreender a morfologia e a dinâmica actual de cada sector de litoral rochoso, como também para prever a sua evolução.

Neste estudo, propõe-se a utilização de uma metodologia que permita construir um modelo para estimar estas duas forças.

2. CÁLCULO DA FORÇA DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS ROCHAS (FR)

As rochas apresentam um conjunto de propriedades físicas – em grande medida derivadas da textura - que determinam a sua capacidade de suportarem o ataque erosivo da ondulação. Esta resistência mecânica das rochas engloba a resistência à compressão uniaxial, à tracção, ao corte e ao impacto. Vários estudos efectuados em laboratório, referidos por Tsujimoto (1987) e por Sunamura (1992), concluem que a resistência à compressão uniaxial apresenta uma correlação positiva elevada com as outras medidas de resistência, razão pela qual se poderá considerá-la como indicador da resistência mecânica das rochas intactas.

Os valores de resistência à compressão uniaxial das rochas existentes num determinado troço de litoral podem ser obtidas sem recurso a exames laboratoriais de amostras, recorrendo a um instrumento leve e portátil, que permite efectuar testes não destrutivos “in situ” – o Martelo de Schmidt. Apesar das limitações conhecidas deste equipamento, é possível obter bons resultados se se seguirem todos os procedimentos indicados por Day e Goudie (1977), Selby (1980) e Sunamura (1992) e se se cruzar a informação assim obtida com o peso específico aparente seco de amostras de cada uma das unidades litológicas estudadas.

A resistência mecânica das rochas intactas que compõem o sopé da arriba pode ser modificada devido à influência de outros factores sintetizados na figura 1, como a estrutura (os planos de estratificação e, em particular, as diaclases, fracturas e falhas), a actividade biológica (exercendo uma acção de destruição, de protecção ou até de construção), a meteorização (de que se salientam a haloclastia, a hidratação/dessecação, a dissolução ou a carbonatação) e, finalmente, a fadiga que se acentua pela acção acumulativa das sucessivas investidas da ondulação. O peso relativo destes factores na diminuição da resistência global da rocha é variável tanto espacial como temporalmente. No modelo desenvolvido, e de acordo com Tsujimoto (1987), Davies *et al* (1991) e Sunamura (1992), entre outros, considera-se que a estrutura terá o papel principal nesta diminuição.

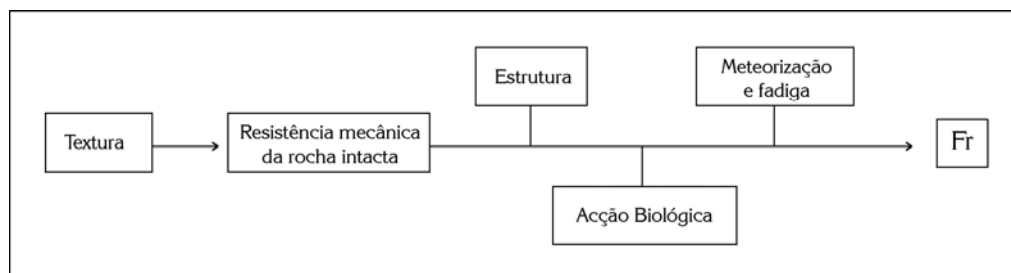


Fig. 1 – Factores que condicionam a força de resistência das rochas no sopé da arriba (Fr).

Fig. 1 – Factors controlling the resisting force of cliff base material (Fr).

De entre os vários métodos propostos para calcular a redução da resistência à compressão da rocha devida à existência de descontinuidades (Tsujimoto, 1987, Barton, 1990, Palmstrøm, 1996, a, b, Hoek e Brown, 1997), optou-se, a exemplo de Budetta *et al* (2000), pela utilização do Índice de Massa Rochosa (RMI) de Palmstrøm (1996, a, b) apoiado nas indicações expressas pela International Society for Rock Mechanics-ISRM (1978), como a metodologia que melhor traduzia aquela realidade. Com

efeito, o RMI conjuga os valores de resistência à compressão da rocha intacta com um Índice geral das descontinuidades (J_p). Este Índice engloba não só as principais propriedades de cada descontinuidade – extensão, persistência, rugosidade e ainda o grau de alteração das paredes que a limitam – como o seu arranjo estrutural condicionado pela densidade das descontinuidades (Fig. 2).

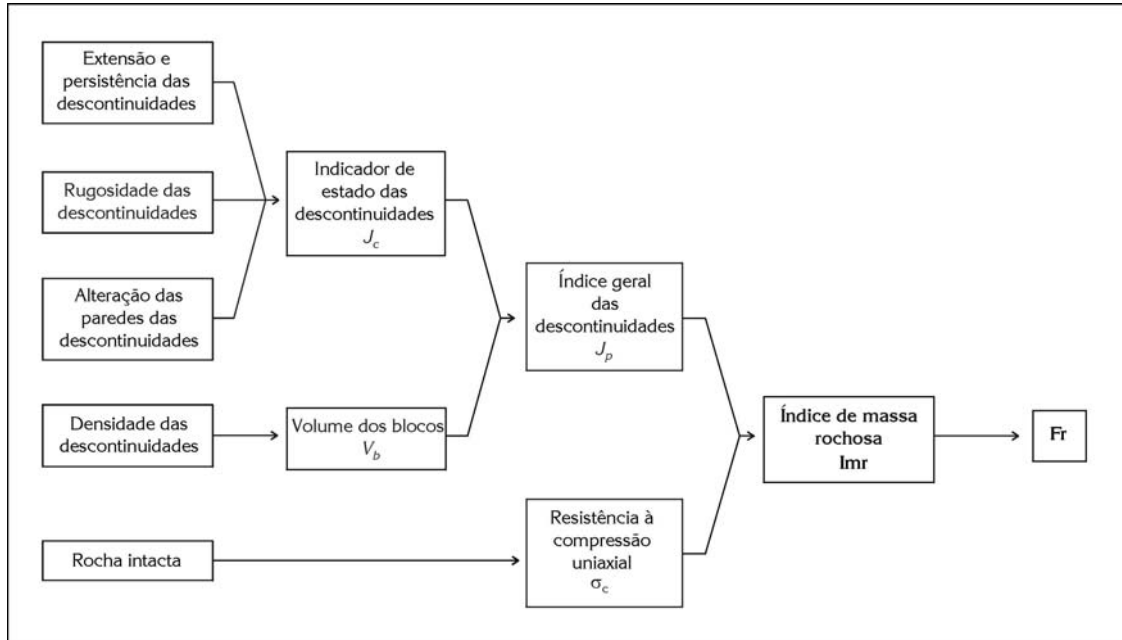


Fig. 2 – Variáveis utilizadas para a determinação do Índice de massa rochosa (RMI)

Fig. 2 – Parameters applied in the Rock Mass index (RMI)

Toda a formulação matemática necessária à obtenção do Índice geral das descontinuidades (J_p) foi obtida com base em testes de laboratório posteriormente calibrados por estudos de análise inversa (back analysis) efectuados no campo.

O levantamento das principais características geométricas e mecânicas das descontinuidades indicadas no modelo – extensão, rugosidade e alteração - segue os procedimentos aconselhados pelo ISRM (1978) com as alterações introduzidas por Palmstrøm (1996, a). O Indicador de estado das descontinuidades (J_c), é obtido pela fórmula:

$$J_c = J_l \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \quad (1)$$

J_l – extensão e persistência da descontinuidade

J_r – rugosidade da descontinuidade

J_a – alteração da descontinuidade

Os valores de J_c variam normalmente entre 1 e 2.

O volume dos blocos individualizados pelas famílias de descontinuidades (V_b) é o factor mais importante no cálculo do Imr . Por isso, a sua determinação implica um elevado grau de precisão que nos permita confiar nos resultados deste índice. Este valor é obtido pela seguinte fórmula:

$$V_b = \frac{\beta J_v^{-3}}{\text{sen}\gamma_1 \text{sen}\gamma_2 \text{sen}\gamma_3} \quad (2)$$

V_b – Volume dos blocos (m^3)

β - parâmetro de forma dos blocos

J_v – nº de descontinuidades por m^3

$\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3$ – ângulos entre os três principais conjuntos de descontinuidades

O parâmetro de forma dos blocos (β) depende fundamentalmente das diferenças entre os espaçamentos das descontinuidades.

$$\beta = (\alpha_2 + \alpha_2 * \alpha_3 + \alpha_3)^3 / (\alpha_2 * \alpha_3)^3 \quad (3)$$

Nesta fórmula, $\alpha_2 = S_2/S_1$ e $\alpha_3 = S_3/S_1$ correspondem à razão entre o comprimento dos dois lados maiores dos blocos (S_2 e S_3) e o comprimento do lado menor (S_1). Porque o espaçamento entre as descontinuidades varia significativamente, a diferença entre os blocos mais pequenos e os maiores pode ser considerável. Por este facto, Palmstrøm (1996, a) sugere que se atribua um intervalo em vez de um valor único ao volume do conjunto dos blocos de uma massa rochosa.

A fórmula para calcular o Índice geral das descontinuidades é a seguinte:

$$J_p = 0.2 (J_c)^{1/2} V_b^D \quad (4)$$

J_c - Indicador de estado das descontinuidades

V_b - volume dos blocos (m^3)

$D = 0.37 J_c^{-0.2}$

Esta fórmula é exponencial porque, segundo Palmstrøm (1996 a, p.176), também o espaçamento das descontinuidades apresenta uma distribuição estatística exponencial.

O Índice J_p varia entre valores pouco acima de zero para rochas muito fracturadas e 1 para rochas intactas.

Obtém-se finalmente o Índice de Massa Rochosa (RMi), expresso em ton/m^2 , que vai representar a força de resistência mecânica da massa rochosa (Fr):

$$RMi = \sigma_c J_p \quad (5)$$

σ_c - resistência à compressão da rocha intacta

J_p - Índice geral das descontinuidades

3. CÁLCULO DA FORÇA EROSIVA DAS ONDAS (FW)

A modelação do comportamento da ondulação na sua aproximação ao litoral é difícil de determinar dadas as condições hidrodinâmicas particulares deste sector, razão porque continua a ser fonte de inúmeros estudos – recenseados recentemente por Longo *et al.* (2002) - que têm contribuído para mostrar a complexidade do tema.

No entanto, é possível sistematizar os principais factores que condicionam as características das ondas que chegam ao litoral (Fig. 3) e, reconhecendo sempre as limitações do modelo, determinar aproximadamente a força erosiva destas ondas.

As ondas no sopé da arriba são condicionadas pelas ondas ao largo, pela altura da coluna de água e pelas características da plataforma continental interna (fundamentalmente declive e rugosidade). As ondas que atingem o sopé da arriba vão aí exercer uma acção hidráulica, a que se juntará uma acção mecânica se houver sedimentos disponíveis para o efeito junto ao litoral.

O modelo desenvolvido determina primeiramente o tipo de onda (não rebentada, em rebentação ou rebentada) que, em cada circunstância, atinge a arriba, comparando a profundidade a que ocorre a rebentação com a altura da coluna de água no sopé da arriba. Para o efeito utiliza-se a fórmula desenvolvida experimentalmente por Tsujimoto (1987):

$$h_b = C_m H_o \left(\frac{H_o}{L_o} \right)^{-0.25} \quad (6)$$

h_b - altura da coluna de água no ponto de rebentação

C_m - constante dependendo do declive da plataforma continental interna d (em $^\circ$);

$C_m = 0.034 / (0.038 + \tan d)$

H_o - altura da onda não refractada

L_o - comprimento da onda não refractada

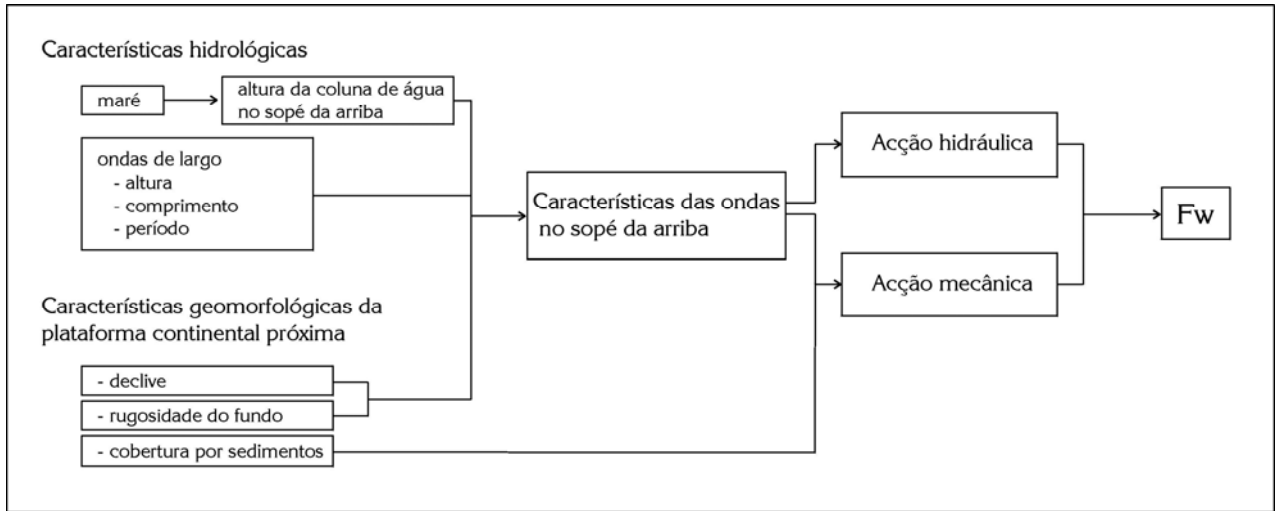


Fig. 3 – Factores que condicionam a força erosiva das ondas no sopé da arriba (Fw).

Fig. 3 – Factors controlling the assailing force of waves at the cliff base (Fw).

Cada tipo de onda aplica diferentes níveis de pressão sobre a arriba, sendo as ondas em rebentação as que exercem a pressão mais intensa. Todas as fórmulas a seguir referidas apresentam valores de pressão expressos em ton/m².

Segundo Tsujimoto (1987), a pressão exercida pelas ondas não rebentadas sobre a arriba é máxima no nível das águas do mar e decresce progressivamente até uma altura equivalente à altura da onda, onde é nula:

$$p_{max} = \left\{ \frac{\rho g H_o}{\cosh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} + \rho g h \right\} \left(\frac{H_o + h_o}{h + H_o + h_o} \right) \quad (7)$$

ρg – peso específico da água salgada

H_o – altura da onda de largo

h – altura da coluna de água no sopé da arriba

L – comprimento de onda no sopé da arriba¹

$h_o = (\pi H^2 / L) \coth(2\pi h / L)$

No caso de ondas em rebentação sobre a arriba, como o demonstram os dados obtidos através da instalação de sensores na arriba levados a cabo por Blackmore e Hewson (1984), os valores mais elevados de pressão exercem-se de uma forma aproximadamente uniforme numa faixa à volta do nível das águas do mar. Estes autores sugerem que a pressão máxima ocorrerá entre $(h - H/2)$ e $(h + H/2)$ e, segundo Sunamura (1992), pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$p_{max} = 35 \rho g (H_o)_b \quad (8)$$

$(H_o)_b$ – altura das ondas de largo que quebram na arriba

Finalmente, para as situações em que a arriba é atingida por ondas já rebentadas, utilizou-se formulação estabelecida pelo Coastal Engineering Research Center (1984) e testada tanto por Tsujimoto (1987), como por Sunamura (1992). Com base neste modelo, a pressão distribui-se uniformemente desde o nível das águas do mar até uma altura H_c , sendo que:

$$H_c = 0.78 H_b \quad (9)$$

H_b - altura das ondas de rebentação

¹ A obtenção do comprimento de onda em águas intermédias ou pouco profundas segue formulação clássica que pode ser encontrada em Sunamura (1992, p. 12)

em que a pressão, neste caso, é igual a:

$$p = 0.5 \rho g h_b$$

(10)

h_b – altura da coluna de água no ponto de rebentação

Convém chamar a atenção que boa parte das fórmulas apresentadas foram desenvolvidas em tanque de ensaio e, embora sendo posteriormente calibradas por testes de campo, a dificuldade de execução destes testes não permite considerar definitivas as formulações obtidas.

Será ainda de referir que os valores encontrados poderão nalguns casos ser subestimados ao não considerar o aumento de pressão sobre a rocha originado por abrasão, sempre que a onda arremessa sedimentos contra a arriba.

4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MODELO

O modelo agora desenvolvido foi testado num local escolhido por permitir discorrer sobre a vantagem e limitações da aplicação de modelos, bem como sobre a necessidade de os complementar com uma análise geomorfológica de campo.

O local em estudo - a Ponta da Mexilhoeira - situa-se a oeste de Cascais (Fig. 4). É um sector de litoral rochoso exposto a SW, localmente talhado em bancadas de material sedimentar do Cretácico inclinadas para leste cerca de 2°, compostas por calcários na base (A) - espessura de 9 a 10m, margas muito argilosas (B) - 1 a 2 m, alternância de calcários (C1) e margas calcárias (C2) em bancadas de 0,5 a 1,0 metros - espessura total de cerca de 10 metros - e, finalmente, no topo espessas bancadas de calcário recifal muito compacto (D) - aqui com 10 m de espessura pois encontram-se truncadas por erosão marinha no topo que pertence à plataforma litoral de Cascais.

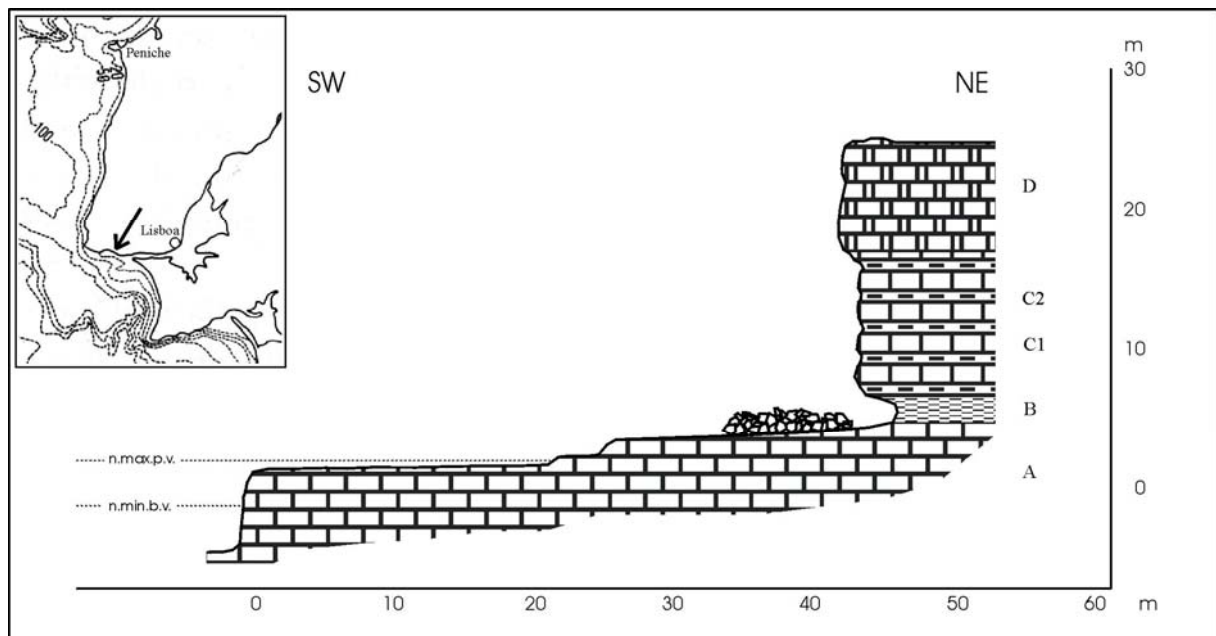


Fig. 4 – Corte geológico na Ponta da Mexilhoeira (Cascais). Litologia: A - calcários; B - margas argilosas; C1 - calcários; C2 - margas calcárias; D - calcários compactos.

n.max.p.v. - nível máximo da preiamar viva; n.min.b.v. – nível mínimo da baixamar viva

Fig. 4 – Geological profile of Ponta da Mexilhoeira (Cascais). Lithology: A - limestone; B – clay marl; C1 - limestone; C2 – limestone marl; D – compact limestone.

n.max.p.v. -spring tides maximum level; n.min.b.v. – spring tides minimum level

Morfológicamente, este troço de litoral rochoso é composto por um sector de arriba mergulhante que se desenvolve entre os 4 metros abaixo do nível médio do mar e 1,5 m acima, a que se segue, para o interior, uma plataforma sub-estrutural com pouco mais de 40 m de largura e uma vertente sub-vertical entre os 5 e os 25 m de altitude.

Para cada uma das unidades litológicas referidas, foi medida a resistência à compressão da rocha intacta e calculada a força de resistência mecânica da massa rochosa por intermédio da determinação do R_{Mi} (Quadro 1). Os valores mais elevados foram obtidos pelas bancadas de calcários compactos do topo e de calcários da base, enquanto o R_{Mi} mais baixo ocorreu na bancada de margas argilosas. É de notar que a elevada fracturação desta bancada tem como consequência uma diminuição muito significativa da resistência global da rocha (mesmo nos sectores com menor número de descontinuidades, correspondendo ao R_{Mi} máximo, a resistência baixa de 1530 para 20,6 ton/m²).

Unidades litológicas	Resistência à compressão (ton/m ²)	R _{Mi} (ton/m ²)		
		mínimo	médio	máximo
D	21420,0	1084,0	4748,0	10710,0
C2	6120,0	313,0	1240,0	2997,0
C1	14484,0	740,0	1936,0	7093,0
B	1530,0	5,0	12,4	20,6
A	14790,0	1310,0	4097,0	7395,0

Quadro 1 – Valores de resistência à compressão uniaxial da rocha intacta e de Índice de massa rochosa (R_{Mi}) das unidades litológicas da Ponta da Mexilhoeira (Cascais).

Table 1 – Intact rock uniaxial compressive strength and Rock Mass index (R_{Mi}) of the different lithological unities at Ponta da Mexilhoeira (Cascais).

Por inexistência de ondógrafo no local, os dados sobre a ondulação foram retirados das observações obtidas pela Bóia-Ondógrafo de Sines para situações de ondulação de SW e WSW, aquelas que atingem o sector litoral em estudo com o mínimo de refração. O modelo indica que, em função do declive da plataforma continental interna e da altura da coluna de água no sopé da arriba em situação de maré alta viva, serão as ondas com cerca de 4,3m de altura as que reventarão sobre a arriba (Quadro 2).

Nesta situação, a pressão máxima exercida pelas ondas pode atingir as 151 ton/m². Comparando este valor com os valores de resistência global das várias rochas existentes neste local, poder-se-á concluir que, de acordo com o modelo, todas as unidades litológicas são resistentes à acção hidráulica da ondulação com excepção da bancada composta por margas argilosas (Quadro 1 – unidade C). Igualmente de acordo com o modelo, esta bancada não oferece resistência a ondas com altura superior a 2,3m. No entanto, dado que esta bancada se encontra cerca de 3 m acima do nível da preiamar viva, é possível afirmar que, nesta situação particular, e de acordo com o modelo, todas as ondas reventadas - ondas com altura superior a 4,3m - (situação relativamente frequente no clima de agitação marinha do litoral oeste português) atingem esta bancada com capacidade erosiva para a destruir.

O modelo desenvolvido permite, deste modo, explicar a evolução geomorfológica deste sector de litoral rochoso com o actual clima de agitação marítima e nível do mar. Assim, a ondulação tem tido capacidade erosiva suficiente para explorar a fragilidade da bancada de margas argilosas, erodindo-a e consequentemente provocando o desabamento gradual das bancadas sobrejacentes por perda da sua base de sustentação. O progressivo recuo do sector cimeiro de arriba devido aos processos agora apontados tem tido como consequência o afastamento da bancada de margas argilosas da frente da arriba, o qual é actualmente superior a 40 metros (Fig. 4). Para além disso, os fragmentos rochosos – na maior parte blocos - resultantes de desabamentos das bancadas calcárias podem exercer sobre a bancada de margas argilosas um efeito de protecção relativamente ao ataque da ondulação.

Será então que, actualmente, a ondulação ainda tem capacidade erosiva para destruir as margas argilosas? A modelação matemática para locais em que o sector de arriba atingido pelas ondas se situa numa posição interior relativamente ao nível das águas, como é o caso do local estudado, é escassa

(CERC, 1984, citado por Sunamura, 1992 e Camfield, 1991) e não terá sido suficientemente testada para poder ser aplicada com o mínimo de segurança. Para o confirmar, torna-se então necessário proceder a uma análise geomorfológica de pormenor.

Altura da coluna de água no sopé da arriba (m)	Declive da plataforma continental interna (°)	Altura das ondas de largo (m)	Tipo de onda no sopé da arriba	Força compressiva	
				nível relativo às águas do mar (m)	pressão máxima (ton/m ²)
5,7	0,859458	1,5	não rebentada	0,0	15,40
		2,0	não rebentada	0,0	19,91
		2,5	não rebentada	0,0	24,18
		3,0	não rebentada	0,0	28,33
		3,5	não rebentada	0,0	32,45
		4,0	não rebentada	0,0	36,62
		4,3	em rebentação	de -2,4 a 2,4	151,40
		4,5	Rebentada	de 0,0 a 3,5	29,33
		5,0	Rebentada	de 0,0 a 3,9	32,78
		5,5	Rebentada	de 0,0 a 4,3	36,37
		6,0	Rebentada	de 0,0 a 4,7	40,02
		6,5	Rebentada	de 0,0 a 5,1	43,73
		7,0	Rebentada	de 0,0 a 5,5	47,50
		7,5	Rebentada	de 0,0 a 5,8	51,33
		8,0	Rebentada	de 0,0 a 6,2	55,21
		8,5	Rebentada	de 0,0 a 6,6	59,14
9,0	Rebentada	de 0,0 a 7,0	63,12		
9,5	Rebentada	de 0,0 a 7,4	67,15		
10,0	Rebentada	de 0,0 a 7,8	71,22		

Quadro 2 – Valores de algumas variáveis necessárias ao cálculo da Força erosiva das ondas no sopé da arriba (Fw) e resultados obtidos para a Ponta da Mexilhoeira (Cascais).

Table 2 – Data of some of the parameters needed to calculate wave force at the cliff base (Fw) and results obtained at Ponta da Mexilhoeira (Cascais).

A observação detalhada da bancada de margas argilosas permitiu verificar que esta funciona como horizonte impermeável da água das chuvas que atravessam as bancadas essencialmente calcárias e bastante permeáveis que lhe estão sobrejacentes. A comprovar esta afirmação estão as inúmeras fontes que se podem encontrar ao longo da bancada de margas argilosas. Estas nascentes, com funcionamento intermitente ao longo do ano, originam uma acção de hidratação/dessecação com consequente expansão e contracção das argilas que contribui de modo muito significativo para a sua desagregação. A presença de inúmeros fragmentos de argila junto à base desta bancada, constatada no decorrer de várias visitas ao local, parece indicar uma predominância actual do processo agora referido e uma ausência de acção marinha, quer erosiva, quer de transporte (Fig. 5).

Para desfazer a dúvida foi analisada uma situação de tempestade. No dia 7 de Dezembro de 2000, Portugal estava sujeito a um estado do tempo em que se sucediam situações depressionárias bastante cavadas a que se associaram sistemas frontais. Estas condições sinópticas vinham afectando de modo semelhante todo o sector atlântico a ocidente de Portugal nos dias precedentes, o que permitiu considerar esta como uma situação ideal para poder utilizar os dados do ondógrafo de Sines, minimizando a margem de erro que a utilização de valores recolhidos num local a cerca de 100km poderia introduzir.

A ondulação registada em Sines neste dia, de W e SW, tinha uma altura significativa a rondar os 6 metros e altura máxima superior a 8 metros.

Na Enseada da Maceira, esta tempestade permitiu por um lado aferir os dados obtidos pelo modelo - ondas com altura superior a 4,3 metros sofriam rebentação antes de chegar à arriba e assim ocorria na

realidade – e por outro verificar que as ondas que chegavam à arriba a atingiam na sua totalidade, logo também a bancada de margas argilosas.

A visita ao local quando a tempestade amainou permitiu constatar não só que a totalidade das palhetas de argila tinham sido removidas pelas ondas, como se notavam evidências da acção erosiva da ondulação.



Fig. 5 – Bancada de margas argilosas na Ponta da Mexilhoeira (Cascais).

Fig. 5 – Clay marl outcrop at Ponta da Mexilhoeira (Cascais).

É, assim, possível concluir relativamente à análise deste local que, com as actuais condições de agitação marítima e nível do mar, o modelo indica que a ondulação tinha capacidade erosiva suficiente para condicionar o recuo do sector cimeiro da arriba e explicar a morfologia actual deste sector. Por outro lado, o progressivo afastamento da bancada mais frágil – as margas argilosas - ao ataque erosivo da ondulação da frente da arriba vai também progressivamente dando importância a outros processos erosivos. Assim, pode-se afirmar que existem evidências de que a bancada argilosa sofre erosão de uma forma continuada pelo escoamento sub-superficial com desagregação das argilas por hidratação/dessecação (processos de elevada frequência e baixa magnitude) e de uma forma pontual e descontínua pela ondulação em situação de tempestade (processo de baixa frequência, mas que pode atingir elevada magnitude).

Agradecimentos

Ao Prof. Arild Palmstrøm pelas cópias de artigos enviadas, bem como pelos esclarecimentos prestados sobre a sua metodologia de cálculo do R_{Mi}.

Ao Prof. Fernando Marques pela leitura atenta do texto e pelas sugestões apresentadas.

BIBLIOGRAFIA

- Barton, N. (1990) – Scale effects or sampling bias? *Proceedings of the International Workshop on Scale Effects in Rock Masses*, Rotterdam, p. 31-55
- Blackmore, P.; Hewson, P. (1984) – Experiments on full-scale wave impact pressures. *Coastal Engineering*, 8, p.331-346.
- Budetta, P.; Galiotta, G.; Santo, A. (2000) – A methodology for the study of the relation between coastal cliff erosion and the mechanical strength of soils and rock masses. *Engineering Geology*, 56, p. 243-256.

- Camfield, F. (1991) – Wave forces on wall. *Coastal and Ocean Engineering*, 117, p. 76-79
- Davies, P.; Williams, A.; Bomboe, P. (1991) - Numerical modelling of lower Lias rock failures in the coastal cliffs of South Wales, *Coastal Sediments*, 91, ed. N.C.Krans, K.J.Girgerich & O.L.Kribel, p. 1599-1612.
- Day, M.; Goudie, A. (1977) – Field Assessment of rock hardness using the Schmidt test hammer. *British Geomorphological Research Group, Technical Bulletin*, 18, p. 19-29.
- Hoek, E.; Brown, E. (1997) – Pratical estimates of rock masses. *International Journal for Rock Mechanics and Mining Sciences* 34, p. 1165-1186.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics (1978) – Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal for Rock Mechanics and Mining Sciences*, 15, p.319-368.
- Kirkby, M. (1987) – Models in Physical Geography in *Horizons in Physical Geography*, ed. M. Clark, K. Gregory, A. Gurnell, Mcmillan Education, Ltd, London, p. 47-61.
- Longo, S.; Petti, M.; Losada, I. (2002) – Turbulence in the swash and surf zones: a review. *Coastal Engineering* 45, p. 129–147
- Marques, F. (1997) – *As arribas do litoral do Algarve. Dinâmica, processos e mecanismos*. Dissertação de Doutoramento. Fac. de Ciências da Univ. de Lisboa. 556 p.
- Neves, M. (1995) - *Dinâmica actual e recente dos litorais rochosos. Exemplos do SW português*, Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Ambiente, apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, 127 p. + anexos, não publicada.
- Palmstrøm, A. (1996a) – Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering. Part I: The development of the Rock Mass index (RMI). *Tunneling and Underground Space Technology*, 11, p.175-188.
- Palmstrøm, A. (1996b) – Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering. Part II: Some practical applications of the Rock Mass index (RMI). *Tunneling and Underground Space Technology*, 11, p.287-303.
- Selby, M. (1980) - A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with tests from Antarctica and New Zealand. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 24 (1), Berlin, p. 31-51.
- Sunamura, T. (1992) – *Geomorphology of rocky coasts*. John Willey & Sons Ltd, Chichester, 302 p.
- Tsujimoto, H. (1987) – Dynamic conditions for shore platform initiation. *Science Reports of the Institute of Geoscience*, University of Tsukuba, Section A, Volume 8, p.45-93.