



## **Planeamento multiobjetivo em projetos de renovação da ferrovia**

**Nuno Sousa**

Universidade Aberta

*nunosousa@dec.uc.pt*

**Luís Alçada-Almeida**

Faculdade de Economia / Universidade de Coimbra

*alcada@dec.uc.pt*

**João Coutinho-Rodrigues**

Departamento de Engenharia Civil / FCTUC

*coutinho@dec.uc.pt*



## PLANEAMENTO MULTI OBJETIVO EM PROJETOS DE RENOVAÇÃO DA FERROVIA

N. Sousa, L. Alçada-Almeida e J. Coutinho-Rodrigues

### RESUMO

O transporte ferroviário é visto como um modo de transporte promissor dos pontos de vista económico, energético e ambiental. No entanto, a ferrovia mundial necessita de intervenções de fundo, uma vez que a competição com o transporte rodoviário levou a falta de investimento nestas infraestruturas no século XX. Apresenta-se aqui um modelo multiobjetivo para o planeamento de renovações na rede ferroviária, atendendo a: distribuição equitativa do investimento pelos anos de projeto, minimização do custo total e minimização dos adiamentos de obras prioritárias. O modelo obedece a restrições operacionais, que visam limitar atrasos à circulação, e adequa-se a renovações que não requeiram fecho de linhas. O modelo é aplicado a um caso de estudo e os resultados mostram um considerável *trade-off* entre os objetivos de distribuição equitativa do investimento e adiamentos de obras prioritárias. Já o custo total só é relevante para redes muito degradadas.

### 1 INTRODUÇÃO

A ferrovia tem reconhecidamente mais-valias económicas, energéticas e ambientais (Banister e Thrustain-Goodwin, 2017), bem como menores externalidades de funcionamento quando comparada com a rodovia (Woodburn, 2017). A Comissão Europeia, atenta a estas vantagens, tem agido no sentido do fortalecimento deste modo de transporte, com ações ao nível da abertura do mercado à concorrência, criação de nova infraestrutura e melhoramento da interoperabilidade e segurança das redes já existentes. Este garante da segurança de pessoas e bens, bem como o normal decorrer dos serviços ferroviários, exige manutenção da ferrovia existente, muita dela degradada após décadas de desinvestimento. No contexto da manutenção, é importante distinguir entre manutenção corrente, destinada a manter o nível de serviço da infraestrutura, e intervenções de renovação, tipicamente mais intensivas e que restauram (ou modernizam) a infraestrutura (Gaudry *et al.*, 2016).

#### 1.1 Revisão bibliográfica

Muito do trabalho científico recente sobre ações de manutenção em infraestruturas de transportes concentrou-se na otimização de manutenção corrente e/ou de renovação. Ifran *et al.* (2012) recorreram a um modelo multiobjectivo e simulações de Monte Carlo para planear renovações de pavimentos rodoviários. Grimes e Barkan (2006) e Yoo e Garcia-Diaz (2008) estudaram a relação custo-eficácia de diferentes estratégias de renovação,

respetivamente em ferrovias e rodovias. A problemática de decisão entre aplicação de manutenção corrente ou de renovação, uma das mais importantes em gestão de infraestruturas, foi investigada para o caso da ferrovia por Guler (2012) e Montesinos-Valera *et al.* (2017). Outros estudos focaram-se em questões técnicas: Wen *et al.* (2016), Vale *et al.* (2012) e Prescott e Andrews (2015) consideraram a otimização de ações de compactação de balastro ferroviário e Caetano e Teixeira (2013, 2014, 2016) utilizaram modelos uni e biobjetivo para otimizar renovações ao nível do balastro, travessas e carris. Li e Roberti (2017), naquela que é talvez a abordagem mais próxima da aqui proposta, estudaram o agendamento de projetos ferroviários de larga escala. No entanto, essa pesquisa focou apenas a minimização do custo total. Na verdade, os aspetos financeiros da manutenção de ativos ferroviários são quase sempre abordados com o objetivo de minimização de custos. Outros aspetos financeiros, tais como o nivelamento de investimento, não foram, tanto quanto os autores puderam apurar, até agora tratados na literatura.

Este artigo propõe-se contribuir para o estado-da-arte em gestão de infraestruturas ferroviárias apresentando uma metodologia multiobjetivo para o planeamento de ações de renovação que conjuga aspetos financeiros com aspetos operacionais. A metodologia tem em consideração três objetivos: distribuição equitativa do investimento pelos anos de projeto, minimização do custo total e minimização dos adiamentos de obras prioritárias. A distribuição equitativa é importante em ações de renovação em larga escala, uma vez que estas exigem um esforço financeiro muito considerável por parte da empresa gestora da infraestruturas, sendo desejável que esse esforço se dilua, tanto quanto possível, por múltiplos anos. Atingir um plano anual de investimentos equilibrado, sem comprometer o esforço financeiro total nem adiar o executar das obras prioritárias é, pois, a motivação para a pesquisa que aqui se apresenta. É de realçar que os objetivos foram definidos por uma empresa de gestão de infraestruturas, a mesma que forneceu os dados para o caso de estudo.

## **2 MODELO MULTIOBJETIVO**

Este artigo segue a terminologia de RailNetEurope (2016). Em particular, “renovação” refere-se a intervenções de fundo subsequentes ao desgaste natural da ferrovia, “linha” refere-se a linhas principais ferroviárias que ligam estações principais, “secção” a partes de uma linha entre dois pontos de referência geográficos. Estes pontos são normalmente estações ou bifurcações, mas podem também ser meros pontos quilométricos.

O modelo é adequado a tratar renovações que não impliquem cortes de linha prolongados ou com reencaminhamento da circulação por múltiplos trajetos alternativos. Tipicamente trata-se de intervenções ao nível dos carris, balastro, travessas, etc. Intervenções nas catenárias ou sub-base requerem, em princípio, outro tipo de abordagem. Enquanto uma secção está em obras, os comboios circulam a velocidade reduzida, o que causa atrasos nos serviços. O modelo não permite, por isso, acumular obras na mesma linha que provoque atrasos demasiado grandes. De igual modo, as linhas não têm todas a mesma importância socioeconómica ou intensidade de serviço, pelo que é necessário atribuir prioridades às secções a renovar. O modelo considera dois períodos de contabilidade, mensal e anual, o primeiro para agendamento das obras e o segundo para orçamentação. Tanto um como o outro podem ser alterados sem afetar a estrutura do modelo.

Considerando o acima e os objetivos:

- O1: minimizar o investimento anual máximo
- O2: minimizar o custo total
- O3: minimizar adiamentos das obras, ponderados por prioridade

o seguinte modelo é apresentado:

*Índices:*

- $i = 1, \dots, M$  secções a renovar
- $j = 1, \dots, N$  meses de atividade
- $k = 1, \dots, P$  anos de investimento ( $N = 12P$ )
- $l = 1, \dots, Q$  linhas a intervir (cada secção pertence a uma linha)

*Parâmetros:*

- $C_i^R$  custo de renovar a secção  $i$
- $C_{ij}^{ME}$  manutenção extra da secção  $i$ , se não estiver renovada no mês  $j$
- $P_i$  prioridade de renovação da secção  $i$
- $T_i$  tempo, em meses, necessário para renovar a secção  $i$
- $D_i$  atraso na circulação, em minutos, causado pelas obras na secção  $i$
- $B_{il}$  1 se a secção  $i$  pertence à linha  $l$ , 0 caso contrário
- $M_l$  atraso máximo na circulação permitido para a linha  $l$

*Variáveis de decisão:*

- $x_{ij}$  1 se a secção  $i$  começar a ser renovada no mês  $j$ , 0 caso contrário (binária)
- $F$  investimento anual máximo (real, positiva)

*Variáveis auxiliares:*

- $A_{ij}$  1 se a secção  $i$  estiver a ser renovada no mês  $j$ , 0 caso contrário (binária)
- $U_{ij}$  1 se a renovação da secção  $i$  não estiver acabada no mês  $j$ , 0 caso contrário (binária)

*Modelo:*

$$\min O_1 = F \quad (1)$$

$$\min O_2 = \sum_i C_i^R + \sum_{ij} C_{ij}^{ME} U_{ij} \quad (2)$$

$$\min O_3 = \sum_{ij} P_i U_{ij} \quad (3)$$

*Sujeito a:*

$$\sum_j x_{ij} = 1, \quad \forall_i \quad (4)$$

$$x_{ij} = 0, \quad \forall_{ij}: j > N - T_i \quad (5)$$

$$A_{ij} = \sum_{j'=j-T_i+1, j' \geq 1}^j x_{ij'}, \quad \forall_{ij} \quad (6)$$

$$U_{ij} = \sum_{j'=j-T_i+1, j' \geq 1}^N x_{ij'}, \quad \forall_{ij} \quad (7)$$

$$\sum_{j=12(k-1)+1}^{12(k-1)+12} \left[ \sum_i \left( \frac{C_i^R}{T_i} A_{ij} + C_{ij}^{ME} U_{ij} \right) \right] \leq F, \quad \forall_k \quad (8)$$

$$\sum_i D_i A_{ij} B_{il} \leq M_i, \quad \forall_{jl} \quad (9)$$

O objetivo O1 é implementado pelas fórmulas (1) e (8), em que o 1º membro de (8) é o investimento anual. Note-se que os custos extra  $C_{ij}^{ME}$  estão ativos até ao fim de obra, mas podem ser considerados de outras formas, como p.ex. ativos até meio da obra. O objetivo O2 tem uma parte fixa e outra variável e foi definido assim para dar ao decisor uma melhor noção dos valores finais. No objetivo O3, as secções vão acumulando valores de prioridade, mês após mês, até serem renovadas. Quanto mais adiada for uma obra de alta prioridade, mais ela vai acumulando em O3. As equações (4) e (5) obrigam a que as obras sejam começadas, e a tempo de acabar antes do último ano. As equações (6) e (7) definem as variáveis auxiliares e a equação (9) são restrições operacionais para contenção de atrasos nas circulações.

Note-se que a estrutura das restrições operacionais (9) permite modelar alguns casos de fecho de linhas, nomeadamente os em que a circulação de pessoas e bens na secção fechada é feita por transporte alternativo. A única modificação é o valor  $D_i$ , que normalmente é superior ao causado por circulação a velocidade reduzida.

É também de referir que os valores numéricos dos parâmetros acima indicados são específicos de cada caso de estudo. Secções heterogéneas, i.e. secções cujos parâmetros associados variem ao longo da extensão geográfica da secção, devem ser divididas em subsecções homogéneas.

### 3 CASO DE ESTUDO

O caso de estudo, caso real facultado por uma empresa gestora de infraestruturas, consta de  $M = 20$  secções a renovar, ao longo de  $P = 5$  anos ( $N = 60$  meses) e pertencendo a  $Q = 17$  linhas. Sempre que foi necessária uma divisão em subsecções, os parâmetros que caracterizam as secções foram obtidos, por recomendação da gestora da infraestrutura, fazendo a média das subsecções homogéneas constituintes, pesadas pelo comprimento das últimas. É importante frisar que todos os parâmetros foram calculados com base em indicações sugeridas pela empresa gestora da infraestrutura e de acordo com valores por esta fornecidos.

A estrutura de custos considera uma degradação exponencial negativa da infraestrutura, que leva a custos extra de manutenção de +3,5%/ano sobre o custo de manutenção corrente, por cada ano em que a renovação exceda o prazo recomendado, i.e. para todo o mês  $j$  pertencente ao ano  $k$  tem-se  $C_{ij}^{ME} = C_{base} \left[ (1 + 0,35)^{(\alpha_i - 1 + k) \times \theta(\alpha_i - 1 + k)} - 1 \right]$ , com  $\alpha_i$  o n.º de anos em que o prazo de renovação é excedido e  $\theta(x)$  a função degrau unitário. No caso de estudo a média de  $\alpha_i$  foi de 10 anos. Este modelo de degradação exponencial negativa é usual em gestão de infraestruturas, mas qualquer outro modelo poderia ter sido usado.

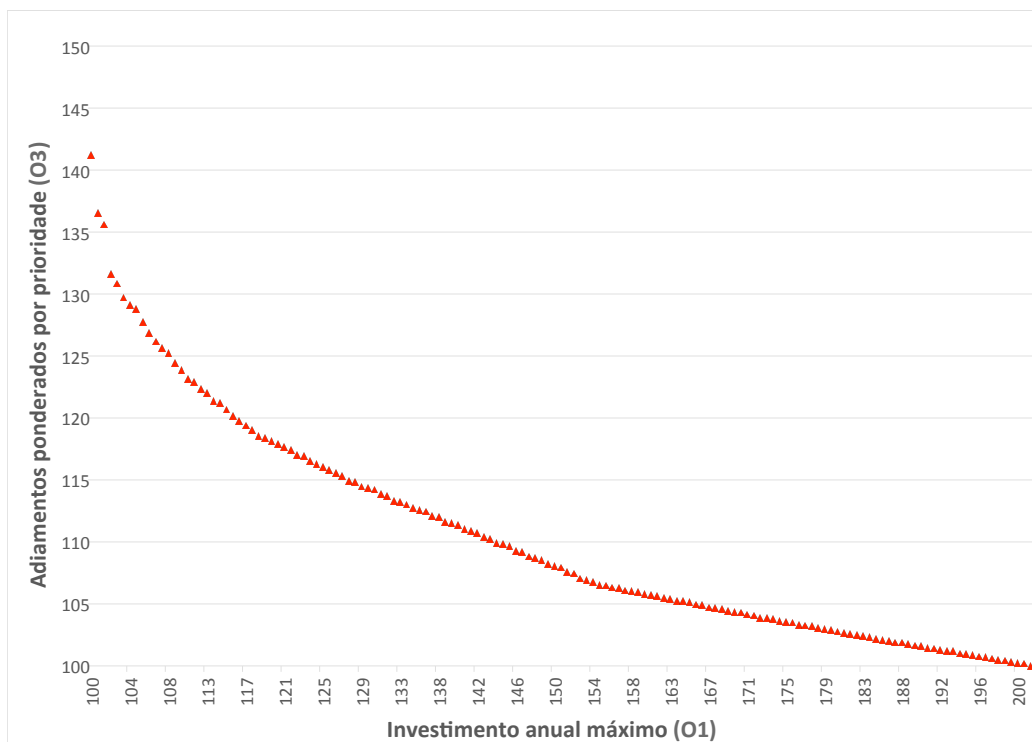
Quanto às prioridades de renovação, estas foram definidas a partir de três características: o tipo de serviço prestado pela linha (TS) a que pertencem as secções, o estado de

conservação (EC) da secção e a intensidade de tráfego de mercadorias (TM). Foram considerados valores de 100/90/75/50 para TS e EC, e 100/90/75/50/40 para TM e a prioridade foi definida por  $P_i = 0,5 TS + 0,3 CS + 0,2 TM$ . Ou seja, cada secção (ou subsecção) tem um valor de TS, CS e TM atribuído conforme as suas características, a partir do qual  $P_i$  foi subsequentemente calculado.

Por último, os atrasos à circulação foram calculados considerando o comprimento das secções e velocidade máxima sob obras, recorrendo a fórmulas de cinemática elementar. Os atrasos máximos e durações de obra foram fornecidos diretamente pela empresa gestora da infraestrutura.

## 2.1 Resultados

A frente de Pareto, i.e. conjunto de soluções não-dominadas (ver e.g. Ehrgott, 2005), geradas pelo modelo matemático para o caso de estudo foi obtida pelo método *epsilon-constraint* no solver IBM CPLEX 12.7 correndo num CPU quad-core @2.6 GHZ. Partindo de soluções com O1 restrito de desde o mínimo possível e gradualmente relaxando esse valor até O1 irrestrito, foram geradas duas soluções por cada valor de O1, uma minimizando O2 e outra minimizando O3. O tempo de CPU total foi inferior a 1 dia. Constatou-se que em todas as soluções obtidas o valor de O2 nunca excedia cerca de 1% do mínimo, pelo que este objetivo foi descartado, dando origem à frente da Fig. 1 abaixo (valores em percentagem, com ótimo = 100%).



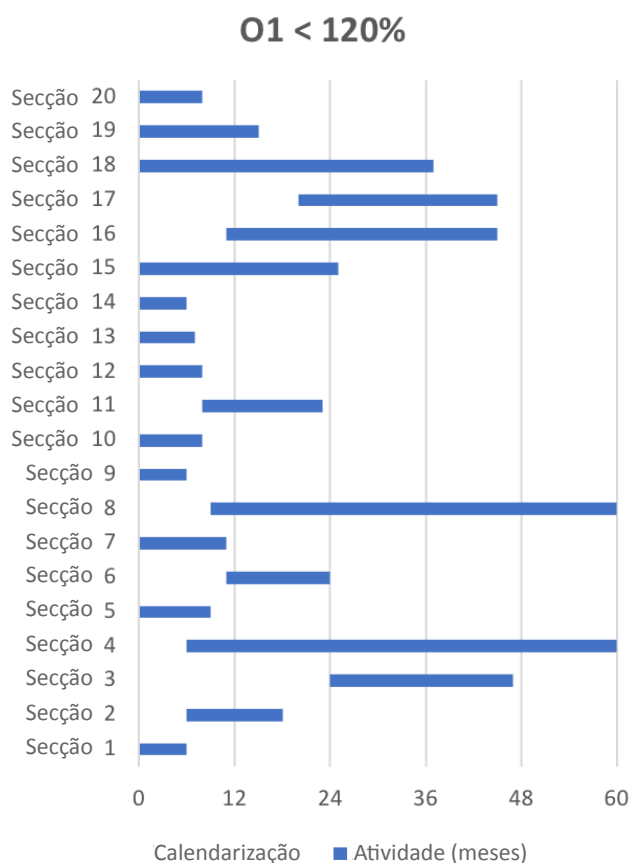
**Fig. 1 Frente de Pareto para o caso de estudo (O2 não representado)**

Como se pode ver, a frente exhibe um comportamento relativamente regular, permitindo ao decisor analisar os *trade-offs* entre os objetivos de distribuir equitativamente o investimento (O1) e acelerar as renovações (O3). As soluções não-dominadas que formam

a frente podem, para efeitos de planeamento, ser representadas como cronogramas de Gantt.

## 2.2 Solução estudada

Na Figura 2 abaixo apresenta-se o cronograma de Gantt para a solução com  $O1 < 120\%$ , min O3.



**Fig. 2 Cronograma de Gantt para a solução O1 < 120%, min O3**

O cronograma exibe, como esperado, uma distribuição das obras a realizar concentrada no primeiro ano. Das 20 secções, 18 têm total ou parcialmente a sua obra agendada para este ano. No último ano apenas duas obras estarão ativas. Se O1 fosse irrestrito, as obras começariam quase todas no primeiro mês; apenas as restrições (9) impediriam que todas se iniciassem nessa altura. Ao invés, se se exigisse nivelamento completo do investimento ( $O1 = 100\%$ ), haveria um maior espalhamento das obras ao longo dos anos. Este cronograma pode agora ser fornecido à equipa que fará a gestão operacional no terreno.

## 2.3 Discussão e conclusões

Como demonstrado pelo caso de estudo, o modelo aqui apresentado fornece ao decisor uma grande gama de soluções não-dominadas, cada uma com as suas vantagens e inconvenientes, mas todas elas ótimas do ponto de vista matemático. A frente de Pareto da Figura 1 e a solução descrita pelo cronograma da Figura 2 permitem ao decisor

compreender as características dessas soluções, tanto de uma forma global (Figura 1) como ao nível do perfil específico de cada solução (Figura 2).

A grande abundância e diversidade das soluções geradas é usual em otimização multiobjetivo e poderá dificultar ao decisor a escolha de uma delas para implementação. No caso de estudo foi possível descartar um objetivo, O2, dada a sua baixíssima variância, o que possibilitou a simplificação da análise *a posteriori* de três para dois objetivos. Isto aconteceu porque para o caso de estudo a média de  $\alpha_i$  (10 anos) é relativamente baixa. No entanto, este fenómeno não é geral: uma simulação com  $\alpha_i$  médio de 25 anos (caso p.ex. da rede ferroviária dos EUA) e 10 anos de duração de projeto revelou que O2 pode, nestas circunstâncias, oscilar entre 100% e 210%, uma variação bastante significativa que justifica plenamente a sua consideração no modelo. Recorde-se que soluções com valores altos de O2 significam que há muito adiamento de obras para os últimos anos, o que acarreta gastos suplementares com manutenção das secções enquanto a sua renovação não é efetuada. A inclusão de O2 no modelo permite tomar em conta este aspeto.

Sempre que o contexto específico do problema em estudo dite que O2 deva ser tomado em consideração, a frente de Pareto torna-se tridimensional e o seu estudo mais complexo. Haverá, pois, que recorrer p.ex. a gráficos 3D ou diagramas BAGAL para visualização ou, em alternativa, pesquisar por soluções não-dominadas usando outras técnicas de geração destas, como p.ex. o método da soma pesada, otimização hierárquica ou *goal programming*.

#### **4 RESUMO**

Neste artigo apresentou-se uma metodologia multiobjetivo para planeamento de renovações de redes ferroviárias. O modelo é linear, solúvel em tempo útil e disponibiliza uma gama de soluções para análise de *trade-offs* pelo decisor, cada qual traduzível em cronogramas de Gantt para posterior implementação no terreno. A metodologia é fortemente inspirada num caso de estudo real e reflete a prática de uma empresa de gestão de infraestruturas, pelo que poderá ser especialmente útil como ferramenta de gestão de ativos. É também facilmente generalizável a outro tipo de infraestruturas, como p.ex. as rodovias. O seu contributo é especialmente útil porque, além de ser multiobjetivo, tem como um destes objetivos o nivelamento de investimento, i.e. a distribuição equitativa do esforço financeiro pelos anos de projeto. Este é um objetivo pouco abordado na literatura, mas muito importante na prática, uma vez que raramente uma gestora de infraestruturas dispõe de capacidade financeira para realizar toda uma obra de larga escala nos primeiros anos.

#### **Agradecimentos**

Trabalho parcialmente financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, sob a ref.<sup>a</sup> PEst-OE/EEI/UI308/2014, e pela iniciativa Energy for Sustainability da Universidade de Coimbra, apoiada pelo projeto Energy and Mobility for Sustainable Regions (EMSURE), sob a ref.<sup>a</sup> CENTRO-07-0224-FEDER- 002004.

## 5 REFERÊNCIAS

- Banister, D. e Thurstain-Goodwin, M. (2011) Quantification of the Non-Transport Benefits Resulting from Rail Investment, *Journal of Transport Geography*, 19(2), 212-223. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.05.001>
- Caetano, L. e Teixeira, P. (2013) Availability Approach to Optimizing Railway Track Renewal Operations, *Journal of Transportation Engineering*, 139(9), 941-948. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000575](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000575)
- Caetano, L. e Teixeira, P. (2014) Optimisation Model to Schedule Railway Track Renewal Operations: a Life-Cycle Cost Approach, *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(11), 1524-1536. <https://doi.org/10.1080/15732479.2014.982133>
- Caetano, L. e Teixeira, P. (2016) Strategic Model to Optimize Railway-Track Renewal Operations at a Network Level, *Journal of Infrastructure Systems*, 22(2), S/N. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000292](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000292)
- Ehrgott, M. (2005) *Multicriteria Optimization*, Springer. ISBN 978-3-540-27659-3
- Gaudry, M., Lapeyre, B. e Quinet, E. (2016) Infrastructure Maintenance, Regeneration and Service Quality Economics: a Rail Example, *Transportation Research Part B: Methodological*, 86, 181-210. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.01.015>
- Grimes, G.A. e Barkan, C.P.L. (2006) Cost-Effectiveness of Railway Infrastructure Renewal Maintenance, *Journal of Transportation Engineering*, 132(8), S/N. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2006\)132:8\(601\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:8(601))
- Guler, H. (2012) Geographic Information System-Based Railway Maintenance and Renewal System, *Transport*, 165(4), 289-302. <https://doi.org/10.1680/tran.10.00067>
- Irfan, M., Khurshid, M.B., Bai, Q., Labi, S. e Morin, T.L. (2012) Establishing Optimal Project-Level Strategies for Pavement Maintenance and Rehabilitation – a Framework and Case Study, *Engineering Optimization*, 44(5), 565-589. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2011.588226>
- Li, R. e Roberti, R. (2017) Optimal Scheduling of Railway Track Possessions in Large-Scale Projects with Multiple Construction Works, *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(6), S/N. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001289](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001289)
- Montesinos-Valera, J., Aragonés-Beltrán, P. e Pastor-Ferrando, J.P. (2017) Selection of Maintenance, Renewal and Improvement Projects in Rail Lines Using the Analytic Network Process, *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(11), 1476-1496. <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1294189>
- Prescott, D. e Andrews, J. (2015) Investigating Railway Track Asset Management Using a Markov Analysis, *Journal of Rail and Rapid Transit*, 229(4), 402-416. <https://doi.org/10.1177/0954409713511965>

RailNetEurope (2016) Glossary of Terms Related to Railway Network Statements. [http://www.rne.eu/rneinhalt/uploads/RNE\\_NetworkStatementGlossary\\_V8\\_2016\\_web.pdf](http://www.rne.eu/rneinhalt/uploads/RNE_NetworkStatementGlossary_V8_2016_web.pdf) (recuperado 03/07/2018).

Vale, C., Ribeiro, I.M. e Calçada, R. (2012) Integer Programming to Optimize Tamping in Railway Tracks as Preventive Maintenance, *Journal of Transportation Engineering*, 138(1), S/N. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000296](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000296)

Wen, M., Li, R. e Salling, K.B. (2016) Optimization of Preventive Condition-Based Tamping for Railway Tracks, *European Journal of Operational Research*, 252, 455-465. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.01.024>

Woodburn, A. (2017) An Analysis of Rail Freight Operational Efficiency and Mode Share in the British Port-Hinterland Container Market, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 51, 190-202. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.01.002>

Yoo, J. e Garcia-Diaz, A. (2008) Cost-effective Selection and Multi-Period Scheduling of Pavement Maintenance and Rehabilitation Strategies, *Engineering Optimization* 40(3), 205-222. <https://doi.org/10.1080/03052150701686937>