Metodologia biobjetivo para reparação de infraestruturas com múltiplos componentes

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

METODOLOGIA BIOBJETIVO PARA REPARAÇÃO DE INFRAESTRUTURAS COM MÚLTIPLOS COMPONENTES

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

RESUMO

Ações de manutenção em sistemas de infraestruturas deparam-se frequentemente com o problema de decidir se uma dada ação deve ser completa ou se uma reparação parcial é suficiente para o caso em questão. A presente pesquisa apresenta um modelo biobjetivo de apoio à decisão para o planeamento da manutenção a longo prazo dos sistemas de infraestruturas, que otimiza a escolha entre reparações parciais, completas ou nenhuma ação a tomar, tomando em consideração aspetos socioeconómicos e descontos por atacado. Os objetivos considerados são a minimização do custo de reparação e maximização dos benefícios trazidos aos utilizadores. O modelo foi testado num caso de estudo 23 passeios e comparado com duas políticas de reparação mais simples, de permitir apenas reparações parciais ou completas, tendo os resultados mostrado que os ganhos de eficiência da política mista ditada pelo modelo são mais significativos na região de orçamento médio-baixo.

1 INTRODUÇÃO

É amplamente reconhecido que a degradação de infraestruturas urbanas, seja pelo seu uso, seja por fenómenos físicos, requer ações de manutenção dispendiosas e que devem, portanto, cuidadosamente planeadas. A gestão otimizada destas ações é, além disso, cada vez mais escrutinada pelo público em geral, tornando-se necessário aos decisores técnicos e políticos um planeamento que pondere tanto os custos das intervenções como os benefícios para os utentes.

Os sistemas de infraestruturas são compostos por diversos elementos (p.ex. sistema: estrada, elementos: pavimento, valetas, bermas, *rails* de proteção, etc.). Cada elemento de cada sistema necessita de manutenção sempre que o seu desempenho caia abaixo dos mínimos exigidos pelos códigos de engenharia. Ao planear as intervenções em sistemas de infraestruturas coloca-se, pois, a questão se um elemento deve ser reparado parcialmente para atingir esse mínimo ou se deve ser completamente reparado para um estado de máximo desempenho.

O presente artigo discute uma metodologia para otimizar as intervenções em cada elemento de múltiplos sistemas de infraestruturas (Sousa *et al.*, 2017a). A metodologia indica qual o grau de intervenção que deve ser efetuada em cada elemento (reparar completamente, reparar parcialmente ou nada fazer) atendendo a dois objetivos: maximizar benefícios e minimizar custos. Os benefícios são definidos para incentivar a reparação de todos os elementos de um sistema e tomam em consideração a importância socioeconómica dos vários sistemas. Quanto aos custos, estes consideram descontos por atacado para cada elemento.

2 MODELO BIOBJETIVO

Antes de apresentar o formalismo matemático do modelo, explica-se brevemente o seu modo de operação.

Cada elemento de cada sistema começa a análise num dado nível de serviço inicial, que se normaliza a um valor entre 0 e 1 (máximo), sendo *T* o limiar de serviço mínimo. O modelo determina depois, de forma otimizada, o nível de serviço final dos elementos, i.e. que tipo de reparação deve ser ter. Elementos cujo nível de serviço final seja $\geq T$ ou 1 dizem-se, respetivamente, parcial ou completamente reparados. Note-se que elementos com nível de serviço inicial $\geq T$ acabam sempre parcialmente ou completamente reparados, sendo que o formalismo matemático acautela devidamente esta situação.

Os elementos têm também um peso associado, que reflete a sua importância para os sistemas, e cada sistema tem um parâmetro, dito "importância socioeconómica", que reflete a sua relevância para os utilizadores. No caso de os sistemas serem estradas, este parâmetro poderá ser definido como p.ex. *I* = comprimento do troço × volume de tráfego.

Dado que os elementos formam sistemas e os sistemas operam plenamente quando todos os seus elementos estão pelo menos ao nível mínimo de serviço, é dado um bónus ao objetivo de maximizar benefícios por cada sistema que acabe parcial ou completamente reparado em todos os seus elementos. Sistemas espacialmente contíguos recebem também um bónus como este, refletindo assim a mais-valia que é ter continuidade espacial nos serviços que prestam.

Por último, na estrutura de custos, consideram-se dois patamares, acima dos quais a restante despesa vem afetada de descontos. Além de realista, isto permite melhorar a relação custo-benefício para intervenções cujo orçamento seja mais generoso.

Consideremos então *i* = 1, ..., *M* sistemas de infraestruturas, cada qual composto por *j* = 1, ..., *N* elementos. No seguinte, notar que os expoentes são índices e não potências. Sejam:

Parâmetros:

S_{ij} nível de serviço inicial do elemento j do sistema i, $S_{ij} \in [0,1]$.

T limiar de serviço mínimo, $T \in]0,1[$.

I_i importância socioeconómica do sistema i, $I_i > 0$.

w_j peso do elemento j, $\sum_j w_j = 1$. Constante para todos os sistemas.

B^2 bónus de benefício se um sistema for pelo menos parcialmente reparado em todos os seus elementos (mas não em todos eles), $B^2 > 0$.

B^3 bónus de benefício se um sistema for completamente reparado em todos os seus elementos, $B^3 > B^2$.

B^R bónus de benefício se dois sistemas espacialmente contíguos forem pelo menos parcialmente reparados em todos os seus elementos, $B^R > 0$.

$R_{i_1 i_2}$ parâmetro binário; 1 se os sistemas i_1, i_2 são contíguos, 0 caso contrário, $i_1 < i_2$.

C_{ij}^2 custo de reparar parcialmente o elemento j do sistema i, $C_{ij}^2 = 0 \; \forall_{ij}: S_{ij} \geq T$, $C_{ij}^2 > 0$ caso contrário.

C_{ij}^3 custo de reparar parcialmente o elemento j do sistema i, $C_{ij}^3 = 0\ \forall_{ij}: S_{ij} = 1$, $C_{ij}^3 > C_{ij}^2$ caso contrário.

L_j^1, L_j^2 limites inferiores para respetivamente os 1º e 2º patamares de gastos acumulados com as reparações do elemento j, $L_j^2 > L_j^1 > 0$.

D_j^1, D_j^2 desconto por atacado sobre a fração dos gastos acumulados com as reparações do elemento j acima 1º e 2º patamares, respetivamente. $1 > D_j^2 > D_j^1 > 0$.

K parâmetro auxiliar, $K > \sum_{ij} C_{ij}^3$.

Variáveis de decisão:

x_{ij}^1 variável binária; 1 se o elemento j do sistema i tiver nível de serviço final abaixo de T, 0 caso contrário.

x_{ij}^2 variável binária; 1 se o elemento j do sistema i for parcialmente reparado, 0 caso contrário.

x_{ij}^3 variável binária; 1 se o elemento j do sistema i for completamente reparado, 0 caso contrário.

Variáveis dependentes:

b_i^2 variável binária; 1 se todos os elementos do sistema i são pelo menos parcialmente reparados e pelo menos um elemento não é completamente reparado, 0 caso contrário.

b_i^3 variável binária; 1 se todos os elementos do sistema i são completamente reparados, 0 caso contrário.

$r_{i_1 i_2}$ variável binária; 1 se os sistemas i_1, i_2 são pelo menos parcialmente reparados em todos os seus elementos, 0 caso contrário, $i_1 < i_2$.

c_j gasto acumulado com as reparações do elemento j sem descontos, $c_j \geq 0$.

c_j^0 parte de c_j sem desconto, $c_j^0 \geq 0$.

c_j^1, c_j^2 partes de c_j acima dos 1º e 2º patamares de gastos, respetivamente, $c_j^1 \geq 0$, $c_j^2 \geq 0$.

u_j^1, u_j^2 variável binária; 1 se respetivamente o 1º/2º patamar de gastos é usado na determinação dos gastos acumulados com as reparações do elemento j, 0 caso contrário.

Modelo:

$$\max O_1 = \sum_{ij:S_{ij}<T} I_i w_j\left(S_{ij}x_{ij}^1 + T x_{ij}^2 + 1x_{ij}^3\right) + \sum_{ij:T\leq S_{ij}<1} I_i w_j\left(S_{ij}x_{ij}^2 + 1x_{ij}^3\right) + \sum_{ij:S_{ij}=1} I_i w_j\left(1x_{ij}^3\right) + \sum_i I_i\, B^2 b_i^2 + \sum_i I_i\, B^3 b_i^3 + \sum_{i_1<i_2}\left(I_{i_1} + I_{i_2}\right) B^R R_{i_1 i_2} r_{i_1 i_2} \tag{1}$$

$$\min O_2 = \sum_j c_j^0 + \sum_j \left(1 - D_j^1\right) c_j^1 + \sum_j \left(1 - D_j^2\right) c_j^2 \tag{2}$$

Sujeito a:

$$x_{ij}^1 + x_{ij}^2 + x_{ij}^3 = 1 \quad ; \quad \forall_{ij} \tag{3a}$$

$$x_{ij}^1 = 0 \quad ; \quad \forall_{ij}:\ T \leq S_{ij} < 1 \tag{3b}$$

$$x_{ij}^1 = x_{ij}^2 = 0 \quad ; \quad \forall_{ij}:\ S_{ij} = 1 \tag{3c}$$

$$b_i^2 \geq \sum_j \left(x_{ij}^2 + x_{ij}^3\right) - N + 1 - b_i^3 \quad ; \quad \forall_i \tag{4a}$$
$$Nb_i^2 \leq \sum_j \left(x_{ij}^2 + x_{ij}^3\right) - b_i^3 \quad ; \quad \forall_i \tag{4b}$$
$$b_i^3 \geq \sum_j x_{ij}^3 - N + 1 \quad ; \quad \forall_i \tag{4c}$$
$$Nb_i^3 \leq \sum_j x_{ij}^3 \quad ; \quad \forall_i \tag{4d}$$
$$r_{i_1 i_2} \leq b_{i_1}^2 + b_{i_1}^3 \quad ; \quad \forall_{i_1 < i_2} \tag{5a}$$
$$r_{i_1 i_2} \leq b_{i_2}^2 + b_{i_2}^3 \quad ; \quad \forall_{i_1 < i_2} \tag{5b}$$
$$r_{i_1 i_2} \geq b_{i_1}^2 + b_{i_2}^2 + b_{i_1}^3 + b_{i_2}^3 - 1 \; ; \; \forall_{i_1 < i_2} \tag{5c}$$
$$c_j = \sum_i C_{ij}^2 x_{ij}^2 + \sum_i C_{ij}^3 x_{ij}^3 \quad ; \quad \forall_j \tag{6a}$$
$$c_j = c_j^0 + c_j^1 + c_j^2 \quad ; \quad \forall_j \tag{6b}$$
$$c_j \geq L_j^1 - K\left(1 - u_j^1\right) \quad ; \quad \forall_j \tag{7a}$$
$$c_j^1 \leq K u_j^1 \quad ; \quad \forall_j \tag{7b}$$
$$c_j \geq L_j^2 - K\left(1 - u_j^2\right) \quad ; \quad \forall_j \tag{7c}$$
$$c_j^2 \leq K u_j^2 \quad ; \quad \forall_j \tag{7d}$$
$$c_j \leq L_j^1 + K u_j^1 \quad ; \quad \forall_j \tag{8a}$$
$$c_j^1 \leq c_j - L_j^1 + K(1 - u_j^1) \quad ; \quad \forall_j \tag{8b}$$
$$c_j \leq L_j^2 + K u_j^2 \quad ; \quad \forall_j \tag{8c}$$
$$c_j^2 \leq c_j - L_j^2 + K(1 - u_j^2) \quad ; \quad \forall_j \tag{8d}$$
$$c_j^0 \leq c_j \quad ; \quad \forall_j \tag{8e}$$
$$c_j^2 \geq c_j - L_j^2 - K(1 - u_j^2) \quad ; \quad \forall_j \tag{8f}$$
$$c_j^1 \leq L_j^2 - L_j^1 + K(1 - u_j^2) \quad ; \quad \forall_j \tag{9a}$$
$$c_j^1 \geq L_j^2 - L_j^1 - K(1 - u_j^2) \quad ; \quad \forall_j \tag{9b}$$
$$c_j^0 \leq L_j^1 + K(1 - u_j^1) \quad ; \quad \forall_j \tag{9c}$$
$$c_j^0 \geq L_j^1 - K(1 - u_j^1) \quad ; \quad \forall_j \tag{9d}$$

Para o objetivo O1 contribuem três tipos de benefício: benefícios dados por melhorias no nível de serviço de cada elemento [1º, 2º e 3º termos de (1)]; benefícios por reparações parciais ou completas em todos elementos de um sistema [4º e 5º termos de (1)]; e benefícios por reparações pelo menos parciais em todos os elementos de sistemas contíguos [6º termo de (1)]. Os termos 4, 5 e 6 de (1) modelam o facto de que os sistemas são compostos por elementos e eventuais relações de contiguidade entre sistemas. Os parâmetros de importância dos sistemas e peso dos elementos refletem o impacto destes nos serviços que prestam aos seus utilizadores.

Para o objetivo O2, o gasto cumulativo com as reparações de cada elemento é separado em três partes: uma sem descontos, uma segunda com descontos e uma terceira com descontos maiores. Esta formulação modela os descontos por atacado: quanto maior o gasto com um elemento, mais barato fica gastar ainda mais.

As restrições (3) definem as ações possíveis para cada elemento de cada sistema. Notar p.ex. que elementos com nível de serviço inicial acima de *T* apenas podem ser deixados como estão ou reparados completamente. As restrições (4) asseguram que os bónus por reparações parciais ou completas em todos os elementos de um sistema são contabilizados corretamente. De igual modo, as restrições (5) asseguram a correta contabilização dos bónus para sistemas contíguos pelo menos parcialmente reparados em todos os elementos.

As restrições (6) definem as variáveis auxiliares de custo e as restrições (7-9) asseguram o correto tratamento dos descontos por atacado, de acordo com o definido no modelo.

Naturalmente, os parâmetros de bónus B^2, B^3 e B^R são subjetivos. Um valor de p.ex. B^2 = 0,4 significa que um sistema parcialmente reparado em todos os seus elementos é 40% mais benéfico aos utilizadores do que a soma dos benefícios individuais desses elementos. Caberá ao decisor usar o seu julgamento para parametrizar o modelo para os melhores efeitos. Iguais considerações se podem tecer para os pesos dos elementos.

3 CASO DE ESTUDO

O modelo foi testado com 23 passeios da cidade de Coimbra, Portugal. Considerou-se para cada passeio (sistema) seis elementos: largura, estado de conservação, acessibilidades, tráfego e zona-tampão de segurança, obstáculos e ambiente envolvente. Os valores de nível de serviço inicial de cada elemento foram obtidos usando a metodologia apresentada em Sousa *et al.* (2017b) e normalizados a uma escala entre 0 e 1, com T = 0,65. Os custos foram orçamentados por uma empresa de construção civil de média dimensão e especificados para cada elemento de cada sistema considerando, para os elementos compostos de várias caraterísticas, a ação mais barata que levasse a um valor de nível de serviço acima de T, ou de 1 no caso de reparações completas. Consideraram-se bónus B^2, B^3 e B^R de 0,3/0,5/0,1 respetivamente e os pesos dos elementos foram, em percentagem e respetivamente, 6,25/43,75/12,5/6,25/12,5/18,75.

Os resultados foram obtidos pelo método *epsilon-constraint* (Cohon, 1978) e recorrendo ao solver CPLEX 12.6.3, correndo num CPU i7 quad-core @2,6 GHz. Para verificar se a possibilidade que o modelo oferece, de escolha entre reparações parciais e completas (política de reparações mista), traz ganhos significativos de eficiência quando comparada políticas de reparação mais simples, de nomeadamente apenas permitir reparações parciais ou completas nos elementos, foram extraídas três frentes de Pareto. A figura 1 abaixo mostra estas frentes.

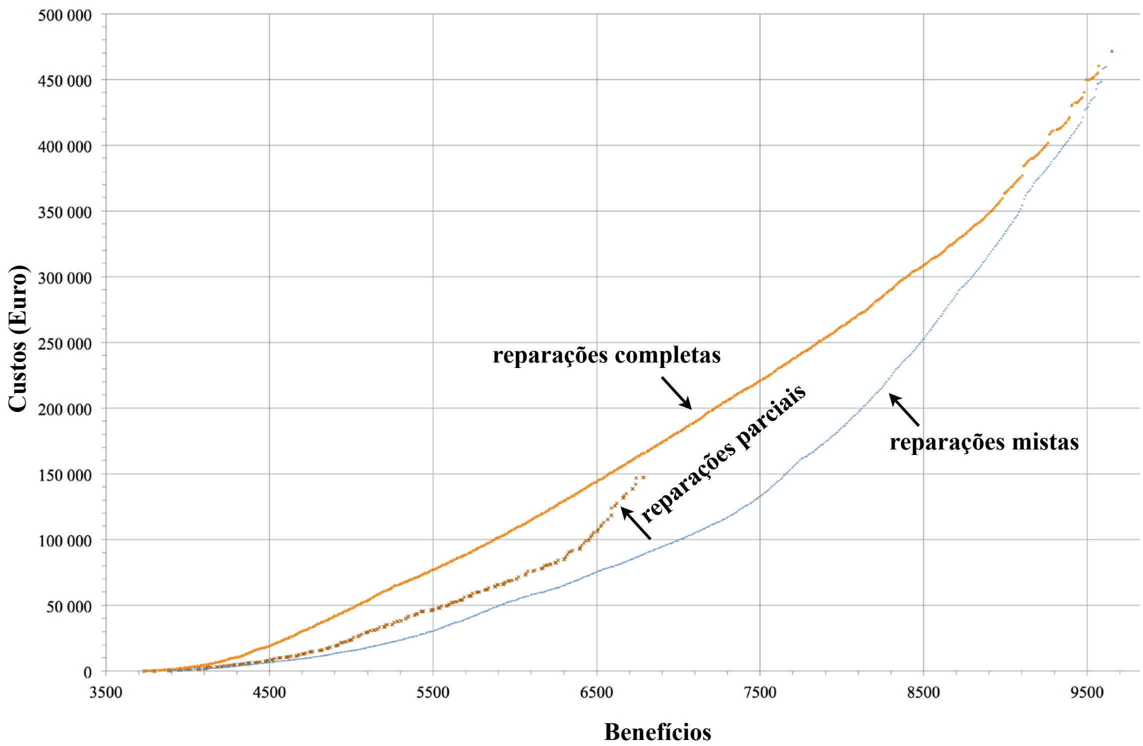

Fig. 1 Frentes de Pareto para três políticas de reparação

Como se pode ver da figura, a política de reparações mistas permite ganhos de eficiência de até cerca de 25% para o mesmo nível de orçamento, comparada com as políticas de reparações parciais ou completas. A vantagem da política mista é que permite escolher um ou outro tipo de reparação, conforme o que é melhor em termos do *trade-off* custo-benefício. A frente mista tenderá a seguir a frente da política de reparações parciais/completas se a razão custo-benefício dos dados do problema em concreto favorecer reparações parciais/completas. Se não houver nenhum enviesamento notório, a frente mista vai descolar das outras duas.

Note-se que a política de reparações mistas exibirá sempre ganhos de eficiência, uma vez que domina as outras duas. No entanto, estes ganhos são mais pronunciados na região de orçamento médio-baixo, que é precisamente a região em que o orçamento começa a permitir mais flexibilidade de escolha entre tipos de reparações. Para orçamentos baixos há uma tendência para as reparações parciais, uma vez que assim se consegue atingir os bónus B^2 e B^R para mais sistemas.

Para testar a sensibilidade destas conclusões a alterações nos parâmetros do modelo, foram efetuadas várias corridas com outros valores de parâmetros e dados simulados, tendo-se verificado que, no geral, as conclusões acima apontadas se mantêm.

4 CONCLUSÕES

Neste artigo propôs-se um modelo biobjetivo para otimizar a gestão de reparações de infraestruturas com múltiplos componentes. A mais-valia do modelo é, além do rigor científico, a flexibilidade de gestão que permite, uma vez que determina, para cada elemento de cada sistema de infraestruturas, a ação de reparação que mais benefícios traz aos utilizadores para o orçamento disponível. Esta flexibilidade, conjugada com o facto de capturar a realidade, tanto em termos de benefícios e sinergias entre eles como de estrutura de custos, torna a abordagem aqui proposta especialmente adequada a problemas concretos de manutenção a longo prazo de infraestruturas.

Agradecimentos

Trabalho parcialmente financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, sob a ref.ª 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.ª CENTRO-07-0224-FEDER-002004. Os autores agradecem também à construtora "Oliveiras S.A." e ao seu CTO Tarcísio Fogeiro pela orçamentação das reparações e discussões sobre a implementação técnica das várias soluções de reparação.

5 REFERÊNCIAS

Sousa, N., Alçada-Almeida, L. e Coutinho-Rodrigues, J. (2017a) Bi-Objective Modeling Approach for Repairing Multiple Feature Infrastructure Systems, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 32(3), 213-226. http://doi.org/10.1111/mice.12245

Sousa, N., Coutinho-Rodrigues, J. e Natividade-Jesus, E. (2017b) Sidewalk Infrastructure Assessment Using a Multicriteria Methodology for Maintenance Planning, ASCE Journal of Infrastructure Systems 23(4). https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000362

Cohon, J. (1978) Multiobjective Programming and Planning, Academic Press, New York, ISBN: 0121783502.