

Um modelo numérico eficiente de análise da interacção via-estrutura em pontes ferroviárias



Joana Delgado¹



Rui Calçada²



Raimundo Delgado³

RESUMO

Neste trabalho é proposto um modelo numérico de análise da interacção via-estrutura, em que a interface via-estrutura é simulada combinando elementos com resistência correspondente à de uma via descarregada e elementos de atrito cuja resistência depende do carregamento normal à superfície de deslizamento. Deste modo a resistência da interface passa a ser função directa da posição e das cargas do comboio, sendo possível a utilização de um único modelo para analisar as diferentes posições do comboio, tornando o processo mais eficiente. As análises foram realizadas com o programa de cálculo ANSYS, tomando como base um caso de referência da ficha UIC 774-3 R.

PALAVRAS-CHAVE

Ponte ferroviária; Interacção via-estrutura; Modelação numérica

¹ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. joanadel@fe.up.pt

² Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. ruiabc@fe.up.pt

³ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. rdelgado@fe.up.pt

1. INTRODUÇÃO

As exigências que se colocam às linhas ferroviárias de alta velocidade têm conduzido à adopção de vias férreas de barra longa soldada (BLS).

Quando a via é colocada de forma contínua sobre uma ponte ou viaduto, ambas as estruturas passam a resistir de forma conjunta às acções do tráfego, das variações de temperatura e da retracção ou fluência do betão. Desta interacção resultam modificações do campo de tensões e de deformações da via, que podem levar a um aumento dos riscos de rotura ou encurvadura do carril e à degradação da camada de balastro ou dos sistemas de fixação.

A análise da interacção via-estrutura envolve a realização de modelos numéricos que permitam ter em conta a configuração e as propriedades da estrutura e da via. Uma das particularidades deste tipo de modelações prende-se com as características da interface via-estrutura. O comportamento desta interface é geralmente traduzido por uma lei bi-linear, do tipo elasto-plástica, cuja resistência limite depende da via se encontrar carregada ou descarregada.

De modo a obterem-se os efeitos mais desfavoráveis para a acção do tráfego, é necessário realizar análises para diferentes posições do comboio. Tal obriga a considerar vários modelos, em que as características dos elementos que simulam a interface são ajustadas em função da via se encontrar carregada ou descarregada, tornando assim o processo de análise bastante moroso.

Neste trabalho é proposto um modelo numérico que permite tornar o processo de análise mais eficiente, combinando elementos de interface com resistência correspondente à de uma via descarregada com elementos de atrito com resistência dependente do carregamento normal à superfície de deslizamento. Desta forma a resistência limite da interface passa a ser função directa da posição e das cargas do comboio, podendo utilizar-se um único modelo para analisar as diferentes posições do comboio.

2. ANÁLISE DA INTERACÇÃO VIA-ESTRUTURA

Em 2001 foi publicada a ficha UIC 774-3R [1] que reflecte os trabalhos da comissão de especialistas D213 do ERRI sobre os efeitos da interacção via – tabuleiro em pontes ferroviárias. As recomendações desta ficha foram em grande parte transpostas para a norma EN1991 2 [2].

De acordo com estes documentos, o estudo da interacção via - tabuleiro envolve a realização de modelos numéricos que permitam ter em conta a configuração e as propriedades da estrutura e da via. O modelo deverá representar adequadamente os apoios, os pilares e as fundações. Em alguns casos é possível substituir os elementos referidos por uma ligação com rigidez equivalente à do conjunto fundação/pilar/apoio (Fig.1).

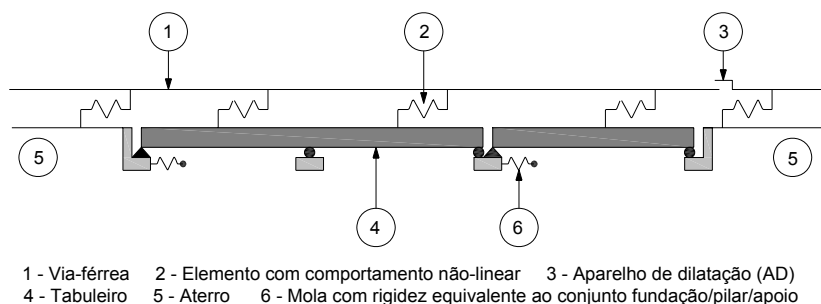


Figura 1. Modelo simplificado para a análise da interacção via – tabuleiro

Os elementos correspondentes aos carris e ao tabuleiro deverão ser posicionados ao nível dos respectivos centros de gravidade. De igual modo, as ligações correspondentes aos aparelhos de apoio deverão estar localizadas ao nível dos seus centros de rotação (Fig.2).

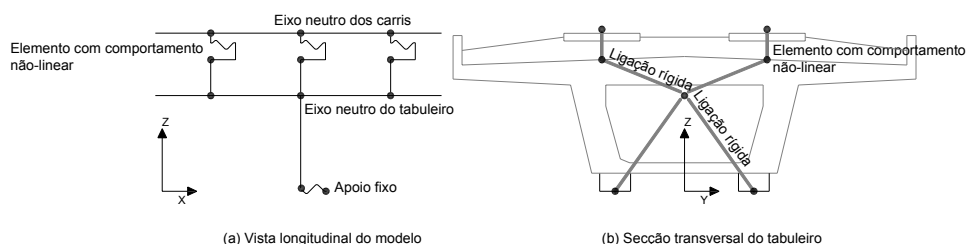


Figura 2. Localização em altura dos elementos correspondentes aos carris, ao tabuleiro e aos apoios

O comportamento longitudinal da ligação via - tabuleiro pode ser traduzido por uma mola cujo comportamento é traduzido por uma relação carga/deslocamento do tipo da representada na Fig.3, ou seja, uma relação bi-linear com um troço elástico inicial até um deslocamento relativo u_0 e um troço que corresponde à plastificação da ligação para uma carga de valor k , expressa em kN/m por metro de desenvolvimento da via.

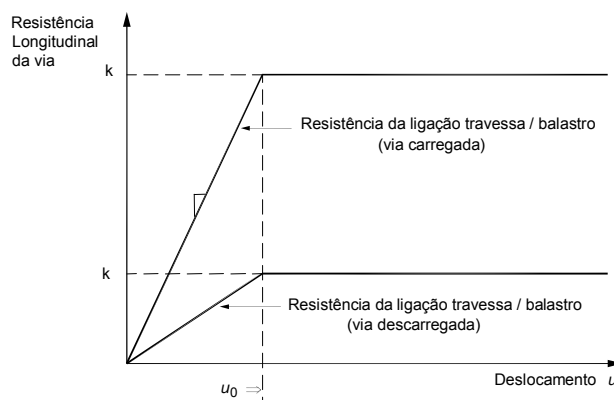


Figura 3. Relação carga - deslocamento da ligação via – tabuleiro

No caso de uma via balastrada, u_0 é igual a 2 mm e k toma valores de 20 ou 60 kN/m por metro de desenvolvimento da via, consoante a via se encontre descarregada ou carregada, respectivamente.

Os efeitos da interacção via-estrutura são assim obtidos por intermédio de análises não lineares do sistema.

De acordo com a EN1991-2, os efeitos totais poderão ser obtidos de forma simplificada por intermédio de sobreposição linear dos efeitos de cada uma das acções isoladas.

3. MODELAÇÃO BASE DE UM CASO DA FICHA UIC 774-3-R

Na Ficha UIC 774-3-R são apresentados diversos casos de referência que poderão ser utilizados na validação de análises numéricas com interacção via-estrutura. Nesta secção apresentam-se os resultados da modelação do caso E1-3 e efectua-se a sua comparação com os resultados referidos por Sanguino e Requejo [3].

3.1 Descrição

O caso E1-3 corresponde a uma ponte com tabuleiro formado por um único tramo simplesmente apoiada com 60 m de vão. Em termos de ligações horizontais apresenta um apoio elástico no encontro esquerdo e um apoio móvel no encontro direito (Fig. 4).

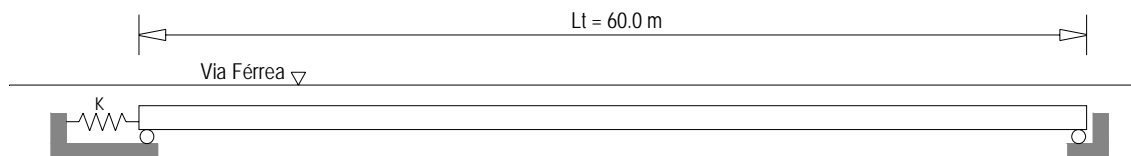


Figura 4. Esquema estrutural da ponte

O tabuleiro é misto, aço-betão, sendo constituído por duas vigas I em aço de alma cheia, ligadas superiormente por uma laje de betão (Fig. 5). A altura total do tabuleiro, H , é igual a 6 m. A distância do centro de gravidade da secção homogeneizada em aço à fibra inferior, v_i , é igual a 4,79 m.

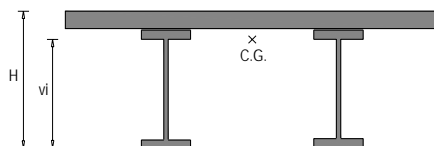


Figura 5. Secção transversal do tabuleiro

3.2 Modelação

Foi modelada uma extensão de via correspondente à ponte e 300,0 m para cada um dos lados da ponte, totalizando 660,0 m. Na Fig. 6 apresenta-se uma imagem do modelo de elementos finitos na zona da ponte, desenvolvido no programa de cálculo ANSYS [4].

O tabuleiro foi discretizado por intermédio de elementos BEAM3 com características correspondentes à homogeneização da secção em aço: módulo de elasticidade $E_h = 210$ GPa; área $A_h = 0,74$ m²; momento de inércia $I_h = 2,59$ m⁴ e coeficiente de dilatação térmica linear $\alpha_h = 1,0 \times 10^{-5}$ /°C.

A via foi igualmente modelada por intermédio de elementos BEAM3 tomados coincidentes, tal com na Ficha UIC 774-3-R, com a face superior do tabuleiro. As características destes elementos correspondem a dois carris UIC 60: módulo de elasticidade $E = 210$ GPa; área $A = 0,0153$ m²; momento de inércia $I = 6,11 \times 10^{-5}$ m⁴; coeficiente de dilatação térmica linear $\alpha_h = 1,2 \times 10^{-5}$ /°C.

O apoio elástico horizontal do tabuleiro foi simulado por um elemento COMBIN14, com rigidez $k = 600 \times 10^3$ kN/m.

A ligação entre os elementos da via e do tabuleiro, e entre os elementos do tabuleiro e os apoios, foi simulada por intermédio de elementos de viga rígidos espaçados de 1 m. Cerca de 5 cm abaixo do carril, foram dispostos elementos COMBIN39 a simular a interface via-tabuleiro. Tomou-se o deslocamento relativo correspondente ao início da plastificação, u_0 , igual a 2 mm e a resistência, k , com valores 20 ou 60 kN/m por metro de desenvolvimento da via, para as zonas da via descarregadas ou carregadas, respectivamente.

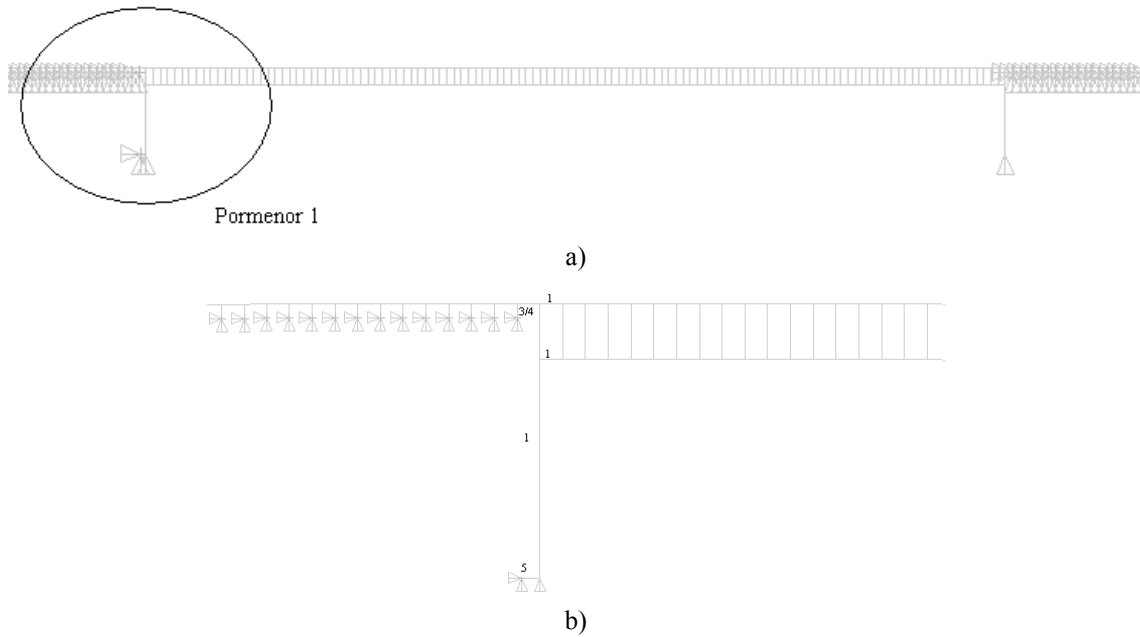


Figura 6. Modelação do sistema via – estrutura: a) alçado na zona da ponte e b) pormenor

3.3 Cenário de análise e resultados

A análise da interacção via – estrutura foi efectuada para as seguintes acções: a) variação uniforme de temperatura no tabuleiro de +35°C; b) sobrecarga correspondente à parte uniformemente distribuída do modelo LM71, ou seja, 80 kN/m; c) frenagem, com valor 20 kN/m.

Na Figura 7 apresentam-se os gráficos relativos à tensão normal nos carris para as acções mencionadas. No caso da sobrecarga e da frenagem, os resultados referem-se a um comboio com um comprimento de 300 m, localizado sobre a ponte com a frente sobre o encontro direito.

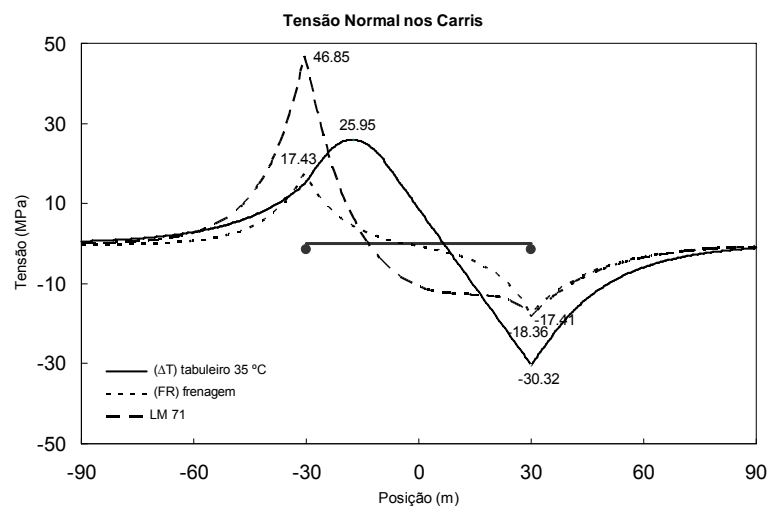


Figura 7. Tensão normal na via para as diferentes acções

Na Figura 8 apresentam-se, para este cenário, os gráficos relativos ao deslocamento absoluto do tabuleiro (δ_t), ao deslocamento absoluto dos carris (δ_c) e ao deslocamento relativo entre o tabuleiro e os carris (δ_r), para as condições referidas.

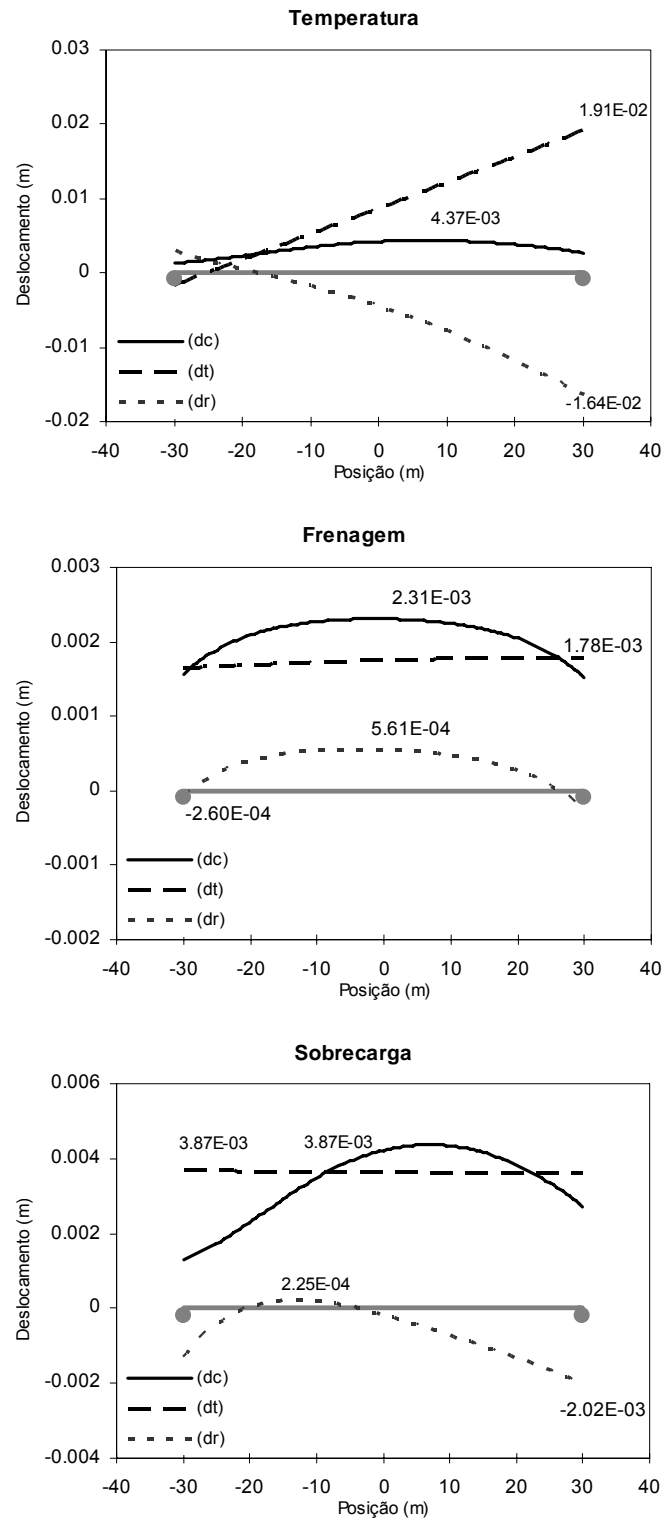


Figura 8. Deslocamentos absolutos do tabuleiro (δt), dos carris (δc) e relativo tabuleiro-carris (δr) para as acções: a) temperatura; b) frenagem e c) sobrecarga

No Quadro 1 resumem-se os valores máximos da tensão de compressão nos carris, do deslocamento total do tabuleiro e do deslocamento relativo via-tabuleiro. No mesmo quadro apresentam-se ainda os efeitos totais, obtidos somando os efeitos das acções isoladas, ou seja, admitindo sobreposição linear dos efeitos. Os resultados são comparados com os resultados obtidos por Sanguino e Requejo [3] para o mesmo caso.

Quadro 1. Comparação dos resultados das análises base e efectuada por Sanguino e Requejo [3]

Acção	σ - [MPa]	δ_r [m]	δ_t [m]
ΔT	-30,3	$-1,64 \times 10^{-2}$	$1,91 \times 10^{-2}$
FR	-17,4	$5,61 \times 10^{-4}$	$1,78 \times 10^{-3}$
LM71	-18,4	$-2,02 \times 10^{-3}$	$3,71 \times 10^{-3}$
$\Delta T + FR + LM71$ (B)	-66,1	$-1,79 \times 10^{-2}$	$-2,46 \times 10^{-2}$
$\Delta T + FR + LM71$ (S)	-66,0	$-1,70 \times 10^{-2}$	$-2,32 \times 10^{-2}$
ε (%) (B-S) / S	0,2	5,1	6,0

B - análise base; S - análise efectuada por Sanguino e Requejo [3]

A observação dos erros relativos, ε , calculados tomando como referência os resultados obtidos pelos autores referidos, são reduzidos, validando a modelação desenvolvida no presente trabalho. Refira-se que a ficha UIC 774-3 R refere que são aceitáveis erros até 10% na validação de modelações numéricas neste tipo de problemas.

4. MODELAÇÃO VARIANTE COM RECURSO A ELEMENTOS DE ATRITO

4.1 Modelação

A modelação apresentada na secção anterior pode tornar-se pouco eficiente quando se pretende analisar os efeitos da interacção via-estrutura para diversas posições do comboio, de modo a obterem-se os efeitos mais desfavoráveis. Nesse caso seria necessário considerar vários modelos, procedendo-se à alteração das características dos elementos da interface via-tabuleiro em função da posição do comboio.

De modo a tornar o processo mais eficiente, foi desenvolvida uma modelação variante combinando elementos de interface via-tabuleiro, com características correspondentes às de uma via descarregada, com elementos de atrito, com resistência dependente do carregamento normal à superfície de deslizamento.

Para o efeito utilizaram-se elementos CONTAC12 da biblioteca de elementos do programa ANSYS. Na Fig. 9 apresentam-se as relações força-deslocamento correspondentes a forças normal (FN) e tangencial (FS). A força tangencial máxima na superfície de deslizamento obtém-se multiplicando o coeficiente de atrito de Coulomb, μ , pela força normal FN. No presente trabalho considerou-se: $KN=1 \times 10^8$ kN/m; $\mu=0,5$ e $KS=20000$ kN/m.

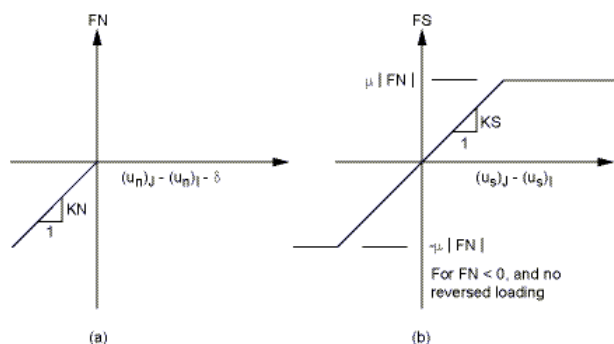


Figura 9. Relações força-deslocamento para o elemento CONTAC12 do programa ANSYS

4.2 Cenário de análise e resultados

A análise da interacção via – estrutura foi efectuada para as seguintes acções: a) variação uniforme de temperatura no tabuleiro de +35°C; b) sobrecarga de 80 kN/m; c) aplicação simultânea da frenagem de 20 kN/m e sobrecarga de 80 kN/m.

Note-se que nesta modelação a frenagem teve de ser aplicada em conjunto com a sobrecarga, caso contrário a resistência da interface via-tabuleiro corresponderia à de uma via descarregada. Aplicando a sobrecarga de 80 kN/m, obtém-se um acréscimo da resistência da interface via-tabuleiro de $0,5 \times 80 = 40$ kN/m, que adicionada à resistência de 20 N/m de uma via descarregada, perfaz a resistência de 60 kN/m de uma via carregada.

No Quadro 2 resumem-se os valores máximos da tensão de compressão nos carris, do deslocamento total do tabuleiro e do deslocamento relativo via-tabuleiro, obtidos com as modelações base e variante e os erros relativos tomando como referência os valores obtidos com a modelação base.

Quadro 2. Comparação dos resultados das análises base e variante

Acção			
	σ - [MPa]	δ_r [m]	δ_t [m]
ΔT	B	-30,3	$-1,64 \times 10^{-2}$
	V	-30,3	$-1,64 \times 10^{-2}$
	ε (%)	0	0
LM71	B	-18,4	$-2,02 \times 10^{-3}$
	V	-19,1	$-2,06 \times 10^{-3}$
	ε (%)	4,0	1,3
FR+LM71	B	-35,8	$-1,46 \times 10^{-3}$
	V	-37,1	$-1,38 \times 10^{-3}$
	ε (%)	3,6	6,9

B - análise base; V - análise variante

A observação do quadro permite verificar que, tal como seria de esperar, os erros para a acção variação da temperatura são nulos. Tal explica-se pelo facto de ser nulo o carregamento normal à via, e portanto coincidirem em ambas as modelações os valores da resistência da interface via-tabuleiro.

Para a acção sobrecarga os erros são também muito reduzidos (inferiores a 4%). Os maiores erros, da ordem de 7%, verificam-se para a actuação simultânea da frenagem e sobrecarga. Refira-se, no entanto, que neste caso os resultados não devem ser comparados de forma directa, pelo facto de na modelação base os efeitos totais resultarem da sobreposição linear (soma) dos efeitos de análises não lineares para cada uma das acções isoladas, enquanto na modelação variante resultarem de uma análise não linear para a acção simultânea de ambas as acções.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta e validada uma modelação variante para a análise da interacção via-estrutura, em que a interface via-estrutura é simulada combinando elementos com resistência correspondente à de uma via descarregada e elementos de atrito cuja resistência depende do carregamento normal à superfície de deslizamento. A resistência da interface passa assim a ser função

directa da posição e das cargas do comboio, possibilitando a utilização de um único modelo para analisar as diferentes posições do comboio, tornando o processo mais eficiente.

Este artigo é resultado de estudos preliminares de modelação da interacção via-estrutura em pontes ferroviárias, efectuados no âmbito dos trabalhos de doutoramento do primeiro autor. O desenvolvimento de metodologias numéricas que permitam incluir nas análises a encurvadura da via e o historial de carregamento, bem como a validação experimental dessas metodologias, constituem também objectivos do trabalho.

AGRADECIMENTOS

Este artigo refere investigação realizada com o apoio financeiro da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Portugal – Ref. SFRH/BD/37912/2007.

REFERÊNCIAS

- [1] EN1991-2. 2003, Actions on Structures – Part 2: General actions – Traffic Loads on Bridges, European Committee for Standardization: CEN.
- [2] UIC Code 774-3-R 2001, Track/bridge interaction – Recommendations for calculation: 2nd edition. October 2001: UIC - Union International des Chemins de Fer.
- [3] SANGUINO, M. and REQUEJO, P. – Numerical methods for the analysis of longitudinal interaction between track and structure. Proceedings of the Workshop Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways. Porto: FEUP, 2007. ISBN 978-972-752-090-0.
- [4] ANSYS, Release 10.0 Documentation for ANSYS, 2005.