

UM MODELO DE ANÁLISE DINÂMICA DE MACIÇOS SUJEITOS A ACCÇÕES DE TRÁFEGO: VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

A MODEL TO PREDICT THE DYNAMIC RESPONSE OF SOIL MASSES UNDER TRAFFIC LOADS: EXPERIMENTAL VALIDATION

Alves Costa, Pedro, *FEUP, Porto, Portugal, pacosta@fe.up.pt*

Bodare, Anders, *KTH, Estocolmo, Suécia, bodare@byv.kth.se*

Calçada, Rui, *FEUP, Porto, Portugal, ruiabc@fe.up.pt*

Silva Cardoso, António, *FEUP, Porto, Portugal, scardoso@reit.up.pt*

RESUMO

O presente artigo apresenta a validação experimental de um modelo de análise dinâmica de maciços sujeitos a acções de tráfego desenvolvido pelos autores. Com tal intuito procedeu-se à análise do comportamento dinâmico do sistema via/maciço no local de Ledsgard, na Suécia. Os resultados da modelação são confrontados com os resultados experimentais para diferentes velocidades de circulação do comboio X2000. Para além disso, apresenta-se também uma análise teórica dos fenómenos dinâmicos envolvidos na questão em estudo bem como alguns resultados da simulação de vibrações na vizinhança da via férrea.

ABSTRACT

The present paper presents a experimental validation of a model for dynamic analysis of railway tracks developed by the authors. With this aim, the dynamic behaviour of the system track/ground in the place of Ledsgard, Sweden, was simulated. The numerical results are compared with experimental ones for different speeds of the train X2000. A theoretical explanation of the dynamic effects and some results of the simulation are also shown.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da tecnologia dos comboios de alta velocidade tem permitido identificar diversas questões relativas ao comportamento dinâmico do sistema via-maciço para as quais a Engenharia Civil tem de dar solução de forma eficaz. Esses problemas dinâmicos são mais susceptíveis quando o traçado impõe o atravessamento de zonas aluvionares constituídas por solos moles. Em casos extremos, a velocidade de propagação das ondas S nestes materiais pode decrescer até 30-40 m/s, o que é extremamente baixo quando comparado com o actual record de velocidade dos comboios de alta velocidade na Europa, que ronda os 580 km/h (160 m/s). Embora esta velocidade de circulação tenha sido alcançada num programa de teste e não em situações de exploração da via, diversos problemas, que até à poucos anos não passavam de questões teóricas, passaram a problemas práticos concretos no presente, e que poderão ainda ser agravados no futuro com o previsível aumento de velocidade de circulação dos comboios.

Para se conseguir dar resposta aos problemas dinâmicos da via, que agravam substancialmente os custos de manutenção, e acautelar vibrações excessivas nas edificações adjacentes à via, urge criar metodologias de análise robustas que constituam ferramentas úteis nos processos de decisão nas fases de projecto e de gestão de manutenção da infraestrutura ferroviária.

O presente artigo tem como objectivo apresentar uma aplicação prática de um modelo de previsão robusto desenvolvido pelos autores. De modo a avaliar a fiabilidade e versatilidade do modelo proposto procedeu-se à simulação do conhecido caso de Ledsgard, na Suécia. O local de Ledsgard situa-se na linha da costa ocidental, próximo de Gotemburgo, e do ponto de vista geotécnico caracteriza-se pela existência de solos argilosos muito moles subjacentes a uma crosta sobreconsolidada de pequena espessura (NGI 1999). Logo após a inauguração da via férrea foram observados fenómenos de grande amplificação dinâmica, agravados com o aumento da velocidade de circulação, que levaram a administração ferroviária sueca (Banverket) a iniciar uma campanha de monitorização do local de forma a permitir a sua compreensão e posterior mitigação. Como tal, Ledsgard tem permitido retirar diversos ensinamentos sobre questões dinâmicas ferroviárias e tem sido analisado por diversos investigadores (Kaynia et al. 2000; Takemiya e Bian 2005; Karlstrom e Bostrom 2006).

Alguns resultados da simulação efectuada são comparados com resultados experimentais em termos das deformações da via férrea para diferentes velocidades de circulação do comboio X2000. Procedeu-se também à simulação da propagação de vibrações na vizinhança da via e a uma análise teórica do problema.

2. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E PROGRAMA EXPERIMENTAL

Tal como anteriormente referido, a Banverket realizou um programa experimental intensivo no local de Ledsgard. O programa incluiu uma caracterização geotécnica exaustiva, contemplando ensaios “in-situ”, especialmente ensaios geofísicos (cross-hole, down-hole, SASW), e também alguns ensaios laboratoriais. Os ensaios “in-situ” tiveram como objectivo a identificação do perfil geotécnico e das características geodinâmicas das formações afectadas pela passagem do comboio. A realização de ensaios triaxiais cíclicos revelou-se muito útil na avaliação da degradação de rigidez do solo e do seu amortecimento de acordo com o nível de distorção, complementando assim a informação proveniente dos ensaios sísmicos. Uma descrição exaustiva do programa de caracterização geotécnica do local pode ser encontrada em Banverket (1999).

No Quadro 1 apresentam-se as propriedades das formações afectadas, para pequenas deformações (baixa velocidade de circulação) e para deformações elevadas (alta velocidade de circulação) de acordo com o proposto por (Kaynia et al. 2000), tendo em conta a dependência da rigidez com o nível de deformação induzida pela passagem do X2000.

Quadro 1 – Propriedades do maciço.

Estrato	Possança (m)	Massa volúmica (kg/m ³)	Pequenas deformações			Grandes deformações		
			V _s (m/s)	V _p (m/s)	β	V _s (m/s)	V _p (m/s)	β
Crosta	1,1	1500	73	500	0.04	65	500	0,063
Argila orgânica	3,0	1260	41	500	0.02	33	500	0,058
Argila 1	4,5	1475	65	1500	0.05	60	1500	0,098
Argila 2	6,0	1475	87	1500	0.05	85	1500	0,064
Semi-indefinido		1475	100	1500	0.05	100	1500	0,060

β - amortecimento

No que se refere ao programa de monitorização do local, este consistiu na medição de deslocamentos da via, velocidades e acelerações de deformação na superfície do terreno e pressões intersticiais no interior do maciço, durante a passagem do comboio X2000 (Figura 1) a diferentes velocidades de circulação (70 km/h a 200 km/h). Alguns resultados da

instrumentação do local serão apresentados no decurso do presente trabalho, sendo no entanto o leitor remetido para Adolfsson et al. (1999) onde uma descrição exaustiva é apresentada.

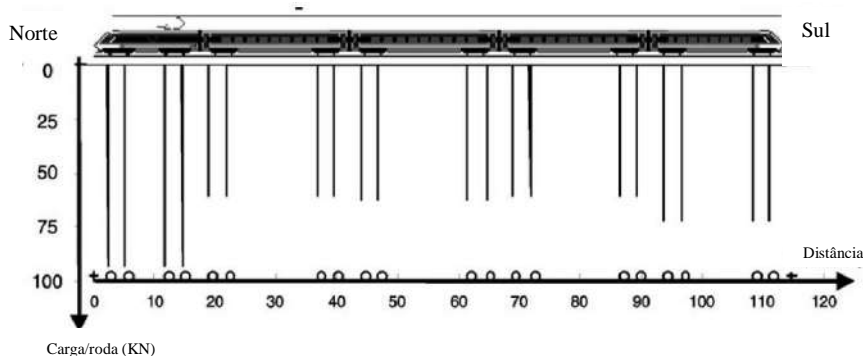


Figura 1 – Geometria e cargas por roda do comboio X2000.

3. ANÁLISE DINÂMICA

A simulação da resposta do sistema face à passagem do comboio foi efectuada através de um modelo matemático baseado no MIT. Esta formulação utiliza transformadas de Fourier relativas ao espaço e ao tempo e permite obter soluções fundamentais para cada velocidade de circulação no domínio de onda/frequência (Alves Costa et al. 2008). Tratando-se de um método de análise no domínio transformado, apresenta como limitação a obrigatoriedade de comportamento elástico-linear para todo o sistema. Por outro lado, do ponto de vista da compreensão dos fenómenos, a linearidade do método permite a interpretação da questão à luz das funções de transferência. Deste modo a resposta de qualquer grandeza (tensões, deslocamentos, etc.) pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$\tilde{R}(k_1, \bar{\omega}) = \tilde{H}_T(k_1, \bar{\omega}) \cdot \tilde{P}(k_1, \bar{\omega}) \quad (1)$$

em que: $\tilde{R}(k_1, \bar{\omega})$ é a resposta no domínio transformado, $\tilde{H}_T(k_1, \bar{\omega})$ é a função de transferência; $\tilde{P}(k_1, \bar{\omega})$ é a acção no domínio transformado; k_1 , é a imagem de Fourier da direcção espacial de movimento da acção; $\bar{\omega}$ é a imagem de Fourier da variável temporal.

A função de transferência é apenas função das propriedades do local (maciço e via), podendo ser representada através de um espectro função do número de onda e da frequência. Esta função é determinada tendo em conta o exposto em Alves Costa et al. (2008) Na Figura 2 apresentam-se as funções de transferência dos deslocamentos verticais da via, considerando as propriedades do maciço referentes a pequenas deformações (Figura 2a) e grandes deformações (Figura 2b), indicadas no Quadro 1. Como referido, a função de transferência depende também do modelo adoptado para simulação da via e respectivas propriedades. As propriedades da via são apresentadas no Quadro 2 e vão de encontro à proposta apresentada em NGI (1999).

Comparando os resultados apresentados nas Figuras 2a e 2b verifica-se que, para o caso em apreço, a degradação da rigidez do maciço e da via com o nível de distorção afecta claramente a função de transferência.

Quadro 2 – Propriedades da via adoptadas na simulação.

Propriedade	Pequenas deformações	Grandes deformações
Largura (2b) (m)	3,0	3,0
Massa (t/m)	10,8	10,8
Rigidez, EI (MNm ²)	200	80
Amortecimento, β	0,10	0,10

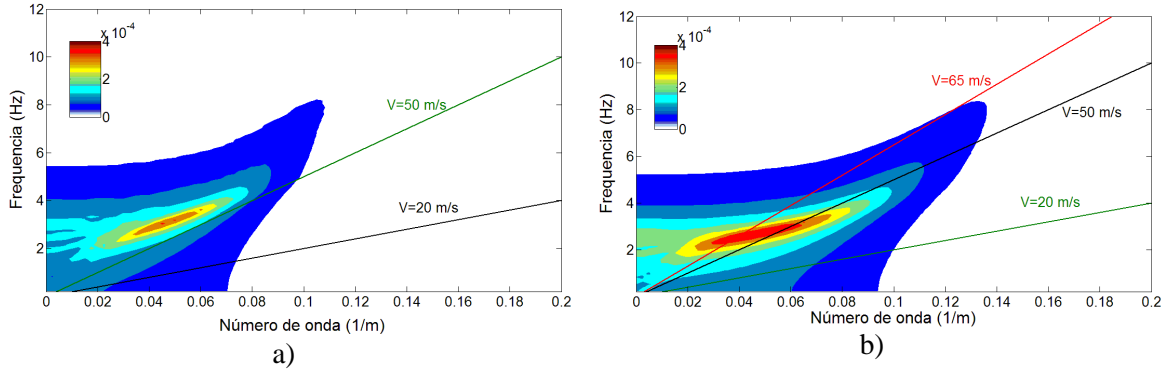


Figura 2 – Funções de transferência do deslocamento vertical da via: a) propriedades correspondentes a pequenas deformações; b) propriedades correspondentes a grandes deformações.

A função $\tilde{P}(k_1, \bar{\omega})$ pode apresentar diversos estágios de complexidade, consoante se considere ou não a interacção comboio-via. No presente trabalho, recorreu-se a uma simulação simplificada em que o comboio não é estruturalmente simulado, sendo apenas considerada a acção das cargas móveis correspondentes à distribuição do peso pelos eixos. Deste modo, a função da acção, $\tilde{P}(k_1, \bar{\omega})$ depende da distribuição de cargas pelos eixos do comboio, sendo dada por:

$$\tilde{P}(k_1, \bar{\omega}) = 2\pi \tilde{P}(k_1) \delta(\bar{\omega} + k_1 c)$$

$$\tilde{P}(k_1) = \sum_{j=1}^n P_j e^{-ik_1 a_j} \quad (2)$$

em que: c é a velocidade de circulação do comboio, P_j é a força transmitida pelo eixo j à via; a_j é a posição espacial do eixo j quando $t=0$ s. Na Figura 3 apresenta-se o espectro de $|P(k_1, \bar{\omega})|$ para o comboio X2000.

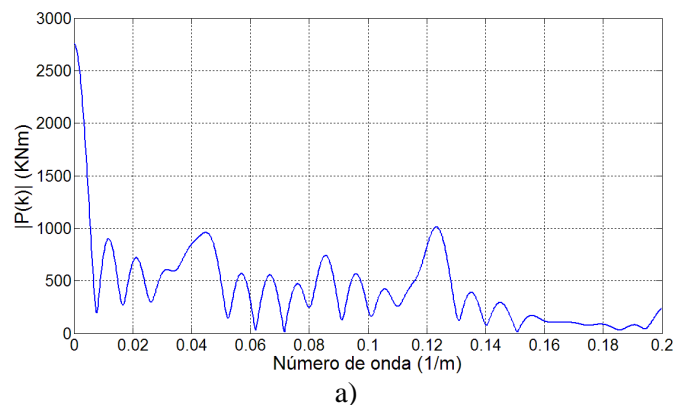


Figura 3 – Espectro de função de carga do comboio X2000.

A função de Dirac que surge na expressão 2, implica que a função de carga só tenha significado quando $\omega = -k_1 c$, ou seja, obrigando a um corte na função de transferência ao longo da linha de velocidade, tal como se encontra representado na Figura 2. Deste modo, a menor ou maior amplificação da grandeza em estudo depende da coincidência ou não dos “picos” da função de carga com os “picos” da função de transferência. Esta propriedade é de grande importância em termos de tempo computacional. Dado o carácter inter-operável que se pretende para as novas linhas de alta velocidade, após determinada a função de transferência para um dado local e para uma dada velocidade, basta multiplicar essa mesma função pela função de carga do comboio, permitindo uma economia considerável em termos computacionais.

Por último, a resposta no domínio da frequência/nº de onda pode ser transformada para o domínio do espaço/tempo através da aplicação de transformadas inversas de Fourier.

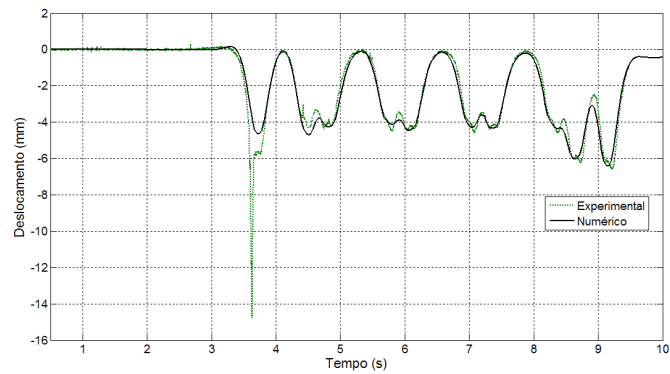
4. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Na Figura 4 apresentam-se os deslocamentos da via, simulados e medidos, para diferentes velocidades do comboio X2000 circulando no sentido Norte-Sul.

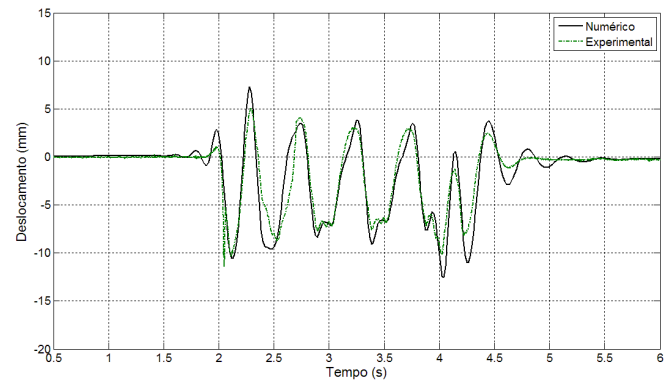
Os resultados apresentados na Figura 4a referem-se a uma velocidade de circulação de 70 km/h, razão pela qual na simulação se adoptaram para a via e maciço as propriedades relativas a pequenas deformações. As Figuras 4b e 4c referem-se a velocidades de circulação de 180 km/h e 202 km/h, respectivamente, tendo-se adoptado na simulação os parâmetros de rigidez e amortecimento degradados, de acordo com o indicado nos Quadros 1 e 2.

A análise dos resultados apresentados na Figura 4 permite constatar que a velocidade de circulação é um parâmetro que afecta claramente a resposta do sistema. Para a velocidade de 70 km/h (19,44 m/s), a velocidade de propagação das ondas de Rayleigh em qualquer estrato do maciço é superior à velocidade de circulação do comboio. Como tal o problema é quasi-estático, ou seja a amplificação dinâmica toma pouco significado. Comparando os resultados experimentais com os numéricos é possível verificar uma muito boa concordância, tanto em amplitude como em termos de evolução temporal da resposta. Apenas uma consideração relativa ao pico que se verifica nos resultados experimentais aos 3,5 s, que corresponde certamente a uma perturbação do sistema de instrumentação utilizado, não tendo qualquer significado físico.

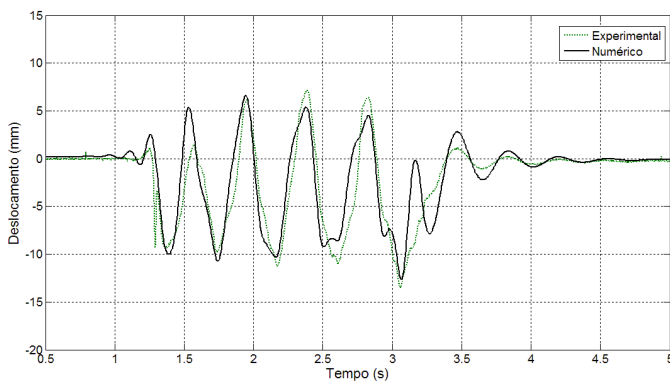
No que toca aos resultados relativos às velocidades de 185 km/h (51,39 m/s) e 202 km/h (56,11 m/s) cabe em primeiro lugar referir que são superiores à velocidade de propagação das ondas S no estrato de argila orgânica, e como tal a amplificação dinâmica do deslocamento da via é muito significativa, assistindo-se a deslocamentos ascendentes e descendentes superiores a 5 mm e 10 mm, respectivamente. Comparando os resultados simulados com os homólogos experimentais, mais uma vez se verifica uma concordância muito boa, tanto ao nível dos deslocamentos de pico como da evolução da história temporal. De sublinhar o facto do modelo simular de uma forma razoável a vibração livre após a passagem do comboio, especialmente no caso de circulação a 202 km/h.



a)



b)



c)

Figura 4 – Comparação da história temporal do deslocamento vertical da via para diferentes velocidades de circulação: a) 70 km/h; b) 185 km/h; c) 202 km/h

5. SIMULAÇÃO DE VIBRAÇÕES NA VIZINHANÇA DA VIA

Para além das questões relacionadas com o comportamento dinâmico da via, a circulação de comboios a alta velocidade pode implicar a geração de vibrações com consequências negativas caso existam edificações na vizinhança da infraestrutura.

O modelo de cálculo desenvolvido pelos autores permite obter as funções de transferência de deslocamentos em qualquer ponto do maciço, sendo por isso possível obter a resposta em qualquer ponto através do procedimento apresentado no ponto 2 do presente trabalho.

Na Figura 5 apresenta-se a velocidade de deformação vertical à superfície do maciço para diferentes distâncias, induzidos pelo comboio X2000 à velocidade de 202 km/h. Os resultados são apresentados quer no domínio do tempo, quer no domínio da frequência. A análise dos resultados apresentados permite constatar que a amplitude da velocidade de deformação decresce acentuadamente com o acréscimo da distância à via, essencialmente devido à atenuação por radiação. Interessante também verificar, através da análise da história temporal, que o evento se torna mais longo à medida que a distância à via aumenta. Analisando os resultados no domínio da frequência, é possível constatar que o conteúdo em frequência se encontra essencialmente abaixo dos 9 Hz, sendo de notar que com o aumento da distância o conteúdo das muito baixas frequências (<3 Hz) perde significado.

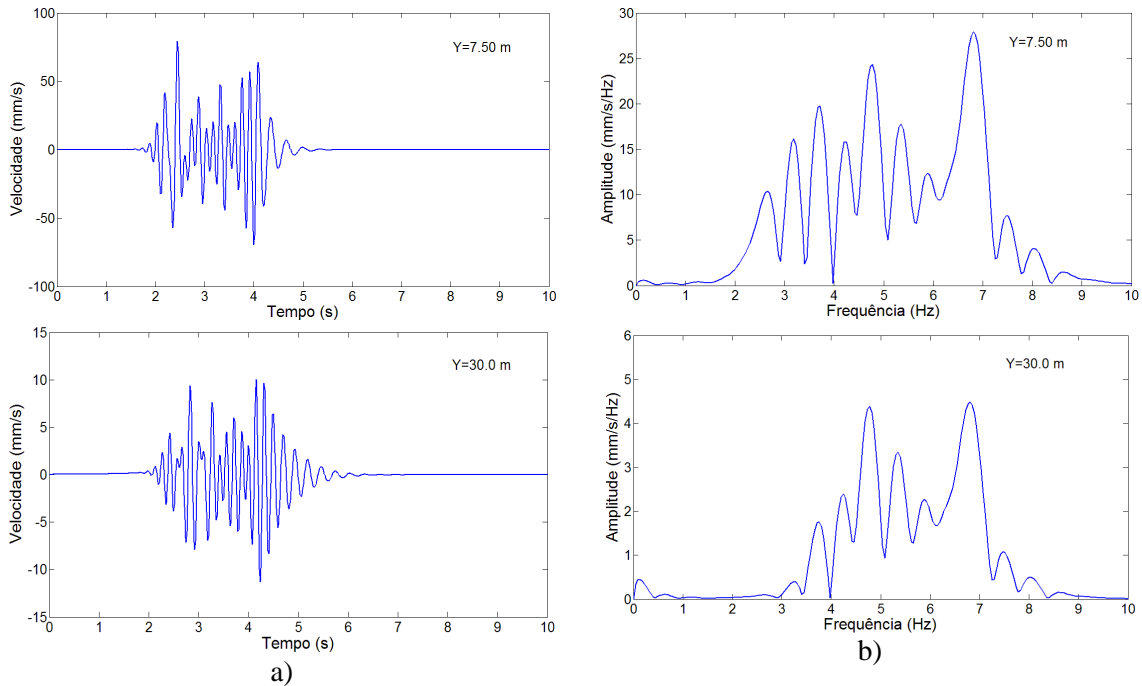


Figura 5 – Deslocamentos verticais a diferentes distâncias da via para a velocidade de circulação de 202 km/h: a) História temporal, b) Espectro de amplitude

Nas Figuras 6a e 6b apresenta-se a evolução da velocidade de pico com a distância à via, em escala linear e em termos de atenuação de vibração em dB, respectivamente. Como se pode verificar, a velocidade de pico decresce exponencialmente com a distância à via. Esta tendência de evolução é corroborada pela análise de diversos trabalhos experimentais apresentada em Madshus (2007)

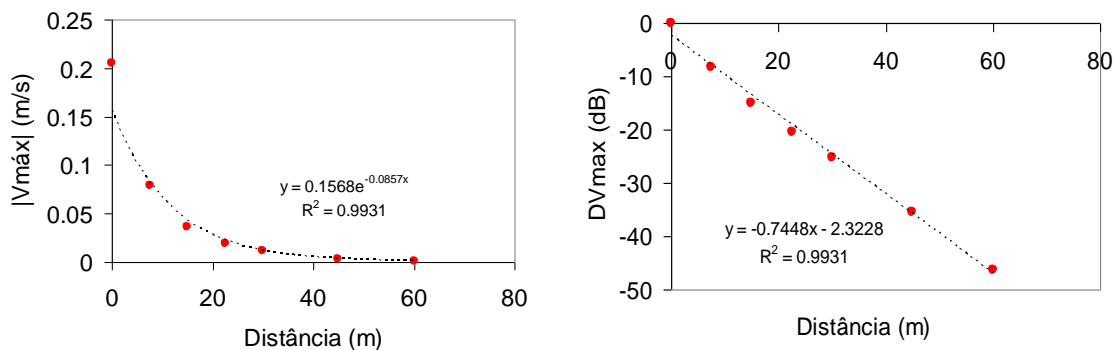


Figura 6 – Evolução da velocidade de pico: a) velocidade versus distância; b) redução da velocidade de pico em dB relativamente à origem

6. CONCLUSÕES

No presente artigo procedeu-se à validação de um modelo de cálculo através da comparação de resultados de simulação com resultados experimentais. A análise efectuada permitiu verificar a fiabilidade e robustez do modelo, sendo que os resultados obtidos se apresentam muito próximos dos experimentais, independentemente da velocidade de circulação do comboio.

Apresentou-se ainda um modelo teórico de compreensão dos fenómenos inerentes à dinâmica da via/macizo através de funções de transferência e de carga. Da abordagem efectuada, evidencia-se a constatação da dependência da amplificação dinâmica das propriedades do macizo e via, da velocidade de circulação, da geometria do comboio e da distribuição de carga pelos diferentes eixos.

Por último, a análise de vibrações em pontos adjacentes à via permitiu comprovar que os níveis de vibração diminuem de forma exponencial à medida que a distância à via aumenta.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à Fundação Calouste Gulbenkian o apoio financeiro para a realização de um estágio de 6 meses no Royal Institute of Technology, em Estocolmo, Suécia.

Este artigo refere investigação realizada com o apoio financeiro da "FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia", Portugal.

REFERÊNCIAS

- Adolfsson, K., B. Andréasson, P. Bengtsson e P. Zackrisson (1999). "High speed train X2000 on soft organic clay - measurements in Sweden." *12th Eur. Conf. Soil Mech. Geotech. Engrg* **3**: 1713-1718.
- Alves Costa, P., A. Bodare, R. Calçada e A. Silva Cardoso (2008). Um modelo de análise dinâmica de maciços sujeitos a acções de tráfego: Implementação e validação. 11º Congresso Nacional de Geotecnia, Coimbra.
- Banverket (1999). High speed lines on soft ground: evaluation and analyses of measurements from the West Coast line. Borlange, Swedish National Rail Administration.
- Karlstrom, A. e B. Bostrom (2006). "An analytical model for train-induced ground vibrations from trains." *Journal of Sound and Vibration* **292**: 221-241.
- Kaynia, M., C. Madshus e P. Zackrisson (2000). "Ground Vibrations from High-Speed Trains: Prediction and Countermeasure." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **126**(6): 531-537.
- Madshus, C. (2007). Geodynamic PhD Course - Traffic vibrations Oslo, Norwegian Geotechnical Institute/Norwegian University of Science and Technology
- NGI (1999). High Speed Lines on Soft Ground - Evaluation and Analysis of Measurements from the West Cost Line.
- Takemiya, H. e X. Bian (2005). "Substructure Simulation of Inhomogeneous Track and Layered Ground Dynamic Interaction under Train Passage." *Journal of Engineering Mechanics* **131**(7): 699-711.