

INFLUÊNCIA DO ACOPLAMENTO RIGIDEZ-AMORTECIMENTO DA FUNDAÇÃO NO DESEMPENHO DE UMA VIA-FÉRREA DE ALTA VELOCIDADE

INFLUENCE OF THE STIFFNESS-DAMPING COUPLING OF THE FOUNDATION IN THE PERFORMANCE OF A HIGH-SPEED TRAIN TRACK

Cunha, José, *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, jpcunha@civil.uminho.pt*
Gomes Correia, António, *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, agc@civil.uminho.pt*

RESUMO

É apresentada uma revisão teórica de alguns trabalhos desenvolvidos na definição das características de deformabilidade de solos sujeitos a carregamentos cíclicos e dinâmicos. Em função destas características foram definidas análises paramétricas para o estudo da influência do nível de deformação cíclica do solo de fundação no comportamento de uma via-férrea de alta velocidade sujeita à passagem de um comboio Thalys a 314 km/h. Para o efeito utilizaram-se modelos numéricos em estado plano de deformação. Apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos através destas análises. Mostra-se neste trabalho que o conhecimento do nível de deformação imposto nos solos de vias-férreas revela-se importante pois poderá implicar um aumento ou uma diminuição da resposta da via em termos de deslocamentos e de vibrações.

ABSTRACT

A brief revision of previous works in the definition of deformability characteristics in soils subject to cyclic dynamic loading is presented. Based on the dependency of stiffness and damping of soils with cyclic shear strain, parametric studies were conducted to investigate the influence of the cycling shear strain in the performance of the rail track subject to the passage of a Thalys high speed train at 314 km/h. The modelling was done through the Finite Element Method in plane strain. The results obtained in those analyses are shown and discussed. It is shown in this work the importance of the shear strain level imposed in the rail track sub grade, in the response of the rail track in terms of displacements and vibrations.

1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Os níveis de exigência associados às vias-férreas de alta velocidade implicam modelos numéricos complexos para previsão do seu comportamento em serviço. Neste sentido, torna-se cada vez mais importante ter em conta o comportamento não linear dos solos que servem de fundação a estas vias. De facto, os solos estão sujeitos a carregamentos cíclicos e dinâmicos e, como tal, a respectiva resposta dinâmica é largamente influenciada pelas características de tensão-deformação do solo.

Encontra-se bem documentado que a maioria dos solos sujeitos a um carregamento cíclico simétrico apresenta uma resposta típica similar à ilustrada na Figura 1 a). Nesta Figura está representada a resposta típica ao primeiro carregamento cíclico, curva de carga OCA, seguida da descarga AB, bem como a recarga BEA. Esta representação é idealizada uma vez que é simétrica e o gráfico “fecha” no ponto A, ou seja é ignorada qualquer degradação da rigidez que possa haver durante o ciclo de carga; assim as partes positiva e negativa da curva são simétricas

em relação ao ponto O. A incorporação deste comportamento cíclico dos solos em modelos numéricos pode ser feita caracterizando a curva através de parâmetros que definam a sua forma de uma maneira simplificada. É assim possível implementar uma abordagem de cálculo linear, iterativo (Seed e Idriss 1970). No geral, os parâmetros que caracterizam a curva são a sua inclinação e o seu tamanho. A inclinação da curva pode ser dada pela sua tangente, que representa em cada instante o módulo de distorção tangente G_{tan} . Embora num ciclo de carregamento G_{tan} varie, a sua média pode ser aproximada pela secante ao pico da curva:

$$G_{sec} = \frac{\tau_a}{\gamma_a} \quad (1)$$

sendo τ_a e γ_a a tensão e extensão de corte, respectivamente. Assim, G_{sec} pode ser considerado o módulo de distorção do solo correspondente a um nível de extensão γ_a . Para níveis de extensão inferiores a 10^{-5} o comportamento dos solos é considerado linear e o módulo de distorção atinge, em geral, um valor máximo, G_0 (Gomes Correia 2004). Conforme o nível de extensão imposta no solo varia, a sua curva de comportamento vai alterando, com os pontos extremos a seguir a curva BOCA (Figura 1 a). O tamanho ou comprimento da curva pode ser convenientemente definido através da sua área, que é uma medida da dissipação de energia, e está por isso relacionada com o coeficiente de amortecimento:

$$\xi = \frac{\Delta W}{4\pi W} = \frac{\Delta W}{2\pi G_{sec} \gamma_a^2} \quad (2)$$

em que ΔW é a área da curva, ou seja a energia de deformação dissipada e W é a energia imposta pela deformação que é dada por:

$$W = \frac{G_{sec} \gamma_a^2}{2} \quad (3)$$

A Figura 1 b) representa a variação da rigidez e do amortecimento do solo com o nível de extensão de corte. Esta representação é típica para a maioria dos solos, mas não exacta uma vez que os valores dependem de vários factores, incluindo o próprio solo. Vucetic e Dobry (1991) recolheram dados de 16 publicações onde se estudava a influência de vários parâmetros geotécnicos nas curvas de variação de G_{sec}/G_0 e ξ com γ_a (Figura 2).

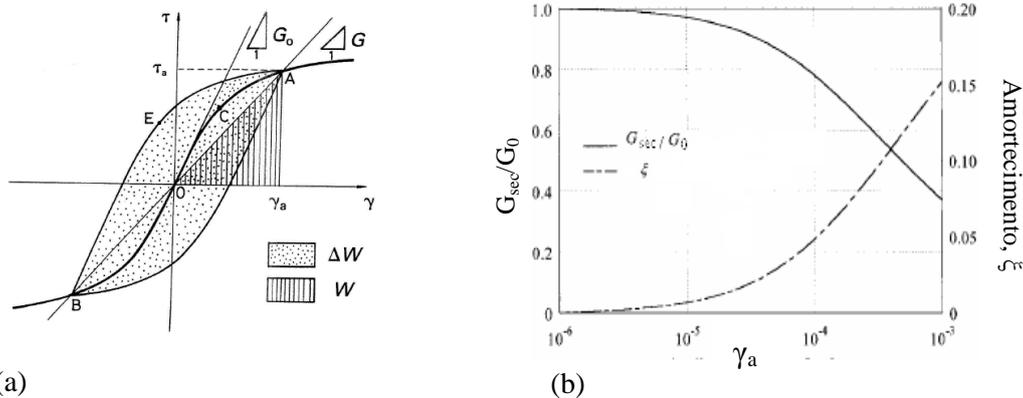


Figura 1 - Comportamento cíclico típico dos solos: (a) relação tensão-extensão de corte para o primeiro ciclo de carregamento (Lopez-Caballero et al. 2004); (b) variação da rigidez e amortecimento em função do nível de extensão de corte (adaptado de Assimaki et al. 2000)

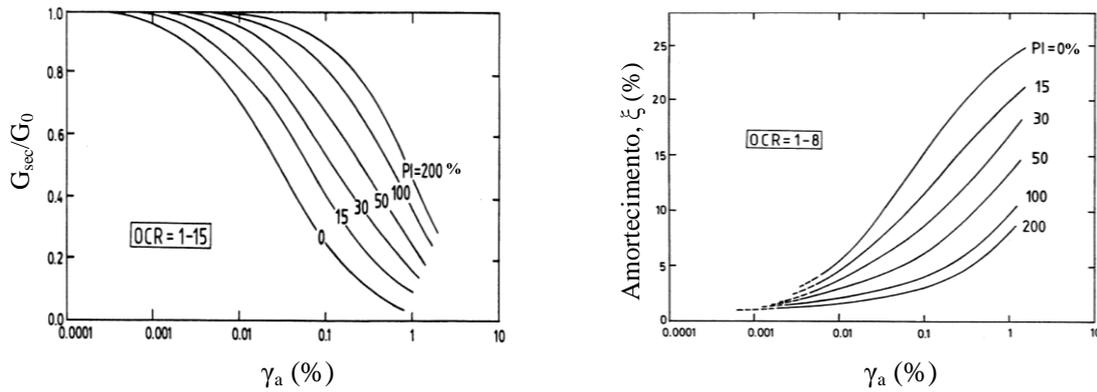


Figura 2 – Relação da extensão cíclica de corte com: (a) rigidez; (b) amortecimento (adaptado de Vucetic e Dobry 1991)

O índice de plasticidade exerce uma grande influência sobre a rigidez do solo. Quanto maior for a plasticidade de um solo maior será a banda de extensões para as quais o comportamento é elástico. Os dados das Figuras 2 a) e 2 b) são válidos para uma vasta gama do grau de consolidação (OCR) confirmando a pouca influência da história do solo nestes parâmetros. Os resultados obtidos para $I_p=0$ são coerentes com os obtidos anteriormente para solos não coesivos (Seed et al. 1986). Com a variação dos parâmetros G_{sec}/G_0 e ξ bem caracterizada pode-se tentar reproduzir melhor o comportamento do solo atribuindo-se-lhe uma rigidez e amortecimento correspondentes ao nível de deformação imposto, resultando assim em modelos de comportamento lineares que têm em conta a não linearidade do material, através da atribuição de parâmetros lineares equivalentes. Estes métodos apresentam várias limitações. De facto, modelos equivalentes lineares implicam que a deformação voltará a zero no final da sollicitação, não sendo por isso indicados para casos com deformações permanentes significativas. Além disso, nunca poderá haver rotura pois em modelos lineares não existe limite de tensão no material. Uma vez que os mais utilizados métodos de análise da resposta de um solo se baseiam na utilização de parâmetros lineares equivalentes, a variação de G_{sec} e ξ em função de γ_a tem sido amplamente estudada para vários tipos de solo.

Ishibashi e Zhang (1993) propuseram uma relação para obter as curvas que relacionam G_{sec}/G_0 com γ_a . A relação é a seguinte:

$$\frac{G_{sec}}{G_0} = K(\gamma, I_p) \times \sigma_0^{m(\gamma, I_p) - m_0} \quad (4)$$

com:

$$K(\gamma, I_p) = 0.5 \left[1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000102 + n(I_p)}{\gamma} \right) \right] \right]^{-0.492} \quad (5)$$

$$m(\gamma, I_p) - m_0 = 0.272 \left[1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right) \right] \right]^{0.4} \exp(-0.0145 I_p^{1.3}) \quad (6)$$

$n(I_p)$ toma os seguintes valores:

$$n(I_p) = \begin{cases} 0.0 & \text{para } I_p = 0 \\ 3.37E-6 \cdot I_p^{1.404} & \text{para } 0 < I_p \leq 15 \\ 7.0E-7 \cdot I_p^{1.976} & \text{para } 15 < I_p \leq 70 \\ 2.7E-5 \cdot I_p^{1.115} & \text{para } I_p > 70 \end{cases} \quad (7)$$

Da mesma forma propuseram uma relação entre G_{sec}/G_0 e ξ que é dada pela seguinte equação:

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 I_p^{1.3})}{2} \left[0.586 \left(\frac{G_{sec}}{G_0} \right)^2 - 1.547 \frac{G_{sec}}{G_0} + 1 \right] \quad (8)$$

Outros autores têm apresentado formulações semelhantes (Santos 1999).

2. CASO DE ESTUDO

Os dados de base deste estudo são, em parte, baseados numa experiência realizada pela Sociedade de Caminhos-de-Ferro da Bélgica num trecho de estudo na linha de Bruxelas-Paris, perto da localidade de Ath, 55km a Sul de Bruxelas (Degrande e Lombaert 2000). Neste trecho foi realizada uma série de medições de vibrações na superestrutura e no solo a distâncias que variam entre 4m a 72m da via, durante a passagem de um comboio Thalys HST, a uma velocidade variável entre 160km/h e 330km/h. Os resultados destas medições serviram de comparação aos obtidos nas simulações numéricas, possibilitando, assim, a validação das ferramentas numéricas utilizadas (Gomes Correia et al. 2007).

3. MODELAÇÕES NUMÉRICAS

Para estudar o efeito da variação da rigidez e amortecimento no desempenho de solos sob vias-férreas de alta velocidade, foi criado um modelo numérico no programa DIANA (TNO 2005). Este modelo em estado plano de deformação incorpora uma via-férrea composta por carril, interface, travessa, balastro, sub-balastro, leito de via e solo de fundação. O estudo baseou-se na escolha de alguns materiais aos quais foi atribuída uma rigidez inicial e admitidos vários níveis de extensão de corte. Considerando simplifcadamente que ν é constante pode-se dizer que:

$$\frac{G_{sec}}{G_0} = \frac{E_{sec}}{E_0} \quad (9)$$

Assim, em vez de se trabalhar com módulos de distorção secantes, podem-se utilizar módulos de deformabilidade secantes, partindo do módulo inicial E_0 . Em função deste valor inicial, a cada um dos valores de extensão admitidos corresponde um valor de E_{sec} e ξ de acordo com as equações 4, 8 e 9. Assim, para cada trio $E_{sec}(\gamma_1)$, $\xi(\gamma_1)$ e γ_1 efectuou-se a análise dinâmica de integração no tempo. Repetiu-se o procedimento para vários valores de γ_a para se poder estudar a variação do comportamento do solo com a extensão de corte. Para caracterizar este comportamento foi aferido para cada caso o valor da aceleração máxima ascendente e do deslocamento máximo descendente na travessa. Um esquema da via-férrea considerada é apresentado na Figura 3.

Os modelos numéricos criados têm 63.3m de largura e 65m de altura; dada a simetria da via e do carregamento, apenas metade da via foi modelada. O modelo final compreende 2775

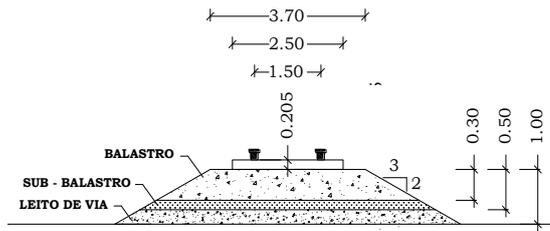


Figura 3 – Estrutura ferroviária considerada, medidas em metros (Gomes Correia et al. 2007)

elementos, sendo 12 deles triangulares de 6 nós, 2601 retangulares de 8 nós, e 162 elementos absorventes. Estes últimos foram utilizados para contabilizar a propagação de vibrações para regiões externas e impedir a reflexão que ocorre quando se utilizam apoios fixos. O programa DIANA considera o amortecimento de Rayleigh de acordo com:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (10)$$

onde $[C]$ representa a matriz de amortecimento, $[M]$ a matriz de massa, $[K]$ a matriz de rigidez, e os parâmetros α e β são os coeficientes de amortecimento.

Para se estabelecer α e β é necessário relacioná-los com o amortecimento hysterético ξ :

$$\xi_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \omega_i \right) \quad (11)$$

sendo ω_i a frequência em estudo e ξ_i o amortecimento correspondente a essa frequência.

Isto é conseguido estabelecendo a relação para duas frequências diferentes às quais correspondem os dois primeiros modos do modelo. O carregamento dinâmico utilizado foi o que corresponde à passagem de um comboio Thalys à velocidade de 314 km/h (Marcelino 2007).

Foi estudada uma areia para diferentes níveis de extensão de corte (Gomes Correia e Cunha 2007) com comportamento extraído de Vucetic e Dobry (1991). Adoptaram-se as equações 4,8 e 9, e considerou-se um valor de $E_0=100\text{MPa}$ e $\sigma'_0=30\text{kPa}$. Os valores máximos de aceleração e deslocamento na travessa em função da extensão de corte estão representados na Figura 4.

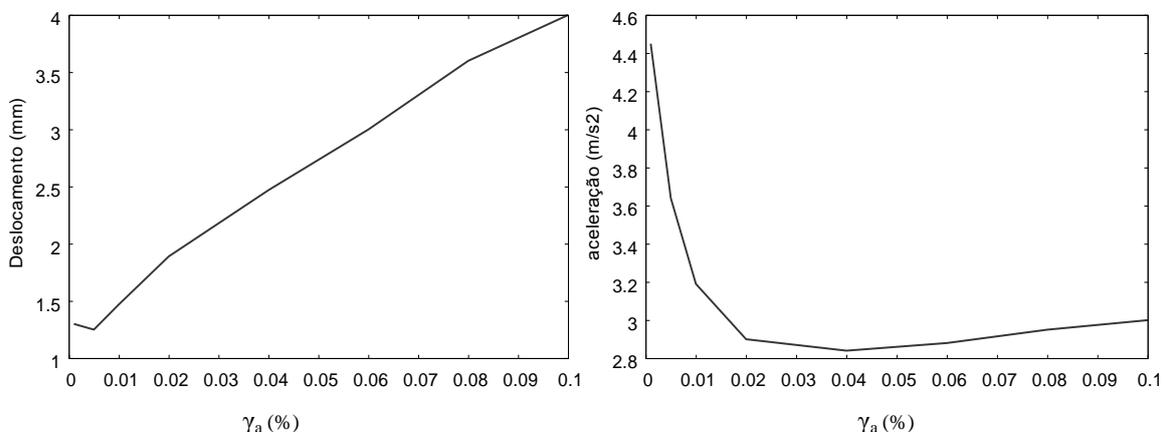


Figura 4 – Valores máximos de deslocamento e aceleração na travessa da via-férrea (Gomes Correia e Cunha 2007)

A relação entre o deslocamento máximo e mínimo é de 310%. As acelerações apresentam uma diminuição considerável até extensões na ordem de 0.02%. É de notar que para extensões superiores a 0.02% as acelerações mantêm-se praticamente constantes. A relação entre a aceleração máxima e mínima é de 148%. A análise dos resultados obtidos sugere que uma optimização da estrutura poderia apontar para níveis de extensão na areia entre 0.01% e 0.02%.

Seguidamente, procedeu-se ao estudo da influência que a consideração da variação da rigidez e amortecimento da fundação têm na resposta da via-férrea. Considerando o aterro e fundação representados pela viga de Winkler (Hung e Yang, 2001):

$$C_{crit} = 4 \sqrt{\frac{4kEI}{m^2}} \quad (12)$$

sendo k a rigidez do solo de fundação, E , I e m respectivamente o módulo de elasticidade, inércia e massa da viga.

Utilizando simplificadaamente esta equação (para este caso tomou-se como viga o aterro da via-férrea) calculou-se que a velocidade estudada (314 km/h) seria crítica para um solo de fundação com E_0 de 160 MPa. Assim, calculou-se a resposta da via-férrea para o caso de uma areia com $E_0 = 160$ MPa. O primeiro cálculo foi efectuado sem ter em consideração a variação dos parâmetros com a extensão de corte. Os resultados encontram-se na Figura 5.

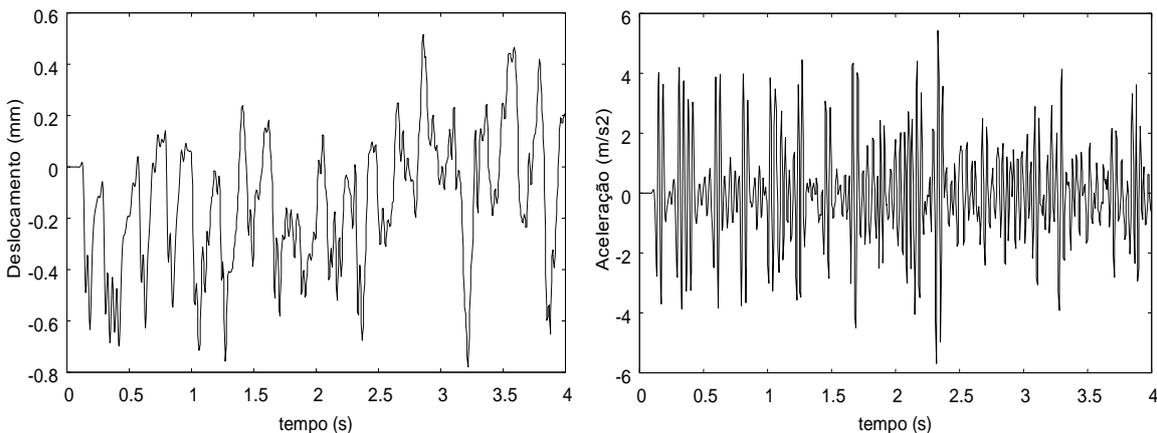


Figura 5 – Deslocamentos e acelerações na travessa ao longo do tempo, no modelo elástico

Para o segundo cálculo dividiu-se o solo de fundação em três camadas, a primeira com 1.4 m de espessura, a segunda com 1.9m e a mais profunda com 60m de espessura (Figura 6). Calculou-se em cada uma das camadas a extensão de corte média obtida no modelo anterior e, tendo em conta as equações 4, 8 e 9 calculou-se a rigidez e amortecimento correspondentes a esse nível de extensão. Construiu-se então um novo modelo com esses valores de rigidez e amortecimento e calculou-se a resposta deste.

Como se pode observar na Figura 7, a contabilização do nível de extensão de corte na definição do modelo tem influências significativas nos resultados obtidos. No caso simplificado, devido à ausência de amortecimento, não é fácil distinguir o momento em que o comboio deixa de solicitar directamente a secção em estudo, pois esta continua em vibração mesmo depois de este passar (Figura 5). Já no segundo caso, consegue-se facilmente saber o momento em que o comboio deixa de solicitar directamente a secção em estudo, conseguindo-se inclusivamente

distinguir a influência de cada um dos eixos do comboio tanto nos deslocamentos como nas acelerações (Figura 7).

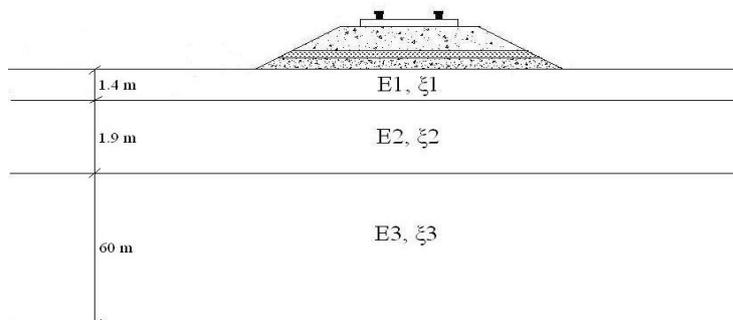


Figura 6 – Representação do modelo com divisão do solo em 3 camadas

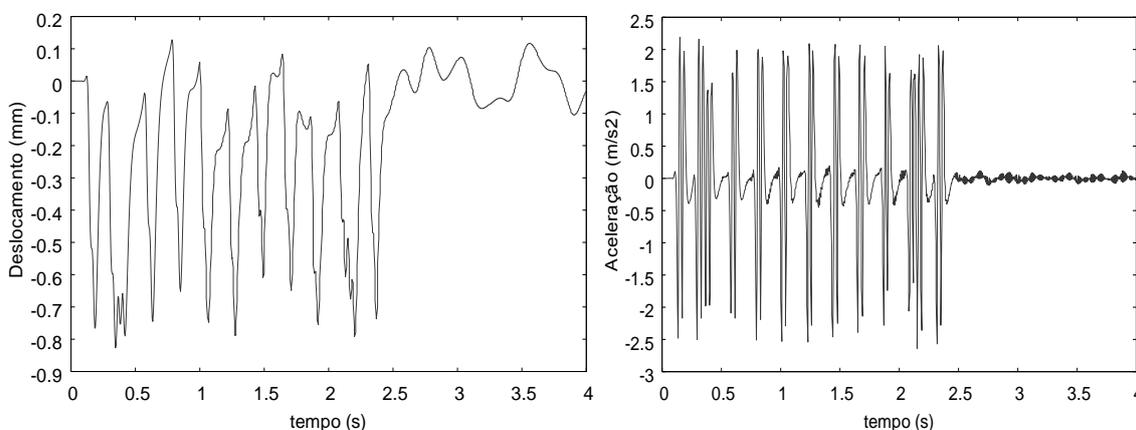


Figura 7 – Deslocamentos e acelerações na travessa ao longo do tempo no modelo linear equivalente multi-camadas

Em relação à ordem de grandeza dos resultados, no primeiro caso obteve-se deslocamentos ascendentes muito elevados sendo os deslocamentos descendentes da mesma ordem de grandeza nos dois casos. As acelerações apresentam diferenças mais significativas com os valores máximos a descerem para metade quando se contabiliza o efeito da extensão de corte. Mostra-se assim que a contabilização da variação da rigidez e amortecimento influencia significativamente a resposta numérica do comportamento da estrutura.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentou-se o estudo da influência do nível de deformação da fundação no comportamento de uma via-férrea de alta velocidade. O estudo foi feito através de análises paramétricas ajustando-se para cada, uma variação de rigidez e amortecimento apropriadas. A análise dos resultados permite observar que a variação da rigidez e amortecimento dos solos devido ao nível de extensão de corte imposto tem influência significativa nos deslocamentos e nas vibrações obtidas. Um dado interessante a reter nos resultados obtidos é que observando as vibrações e os deslocamentos obtidos, a conjugação destes sugere que seria favorável para o desempenho da via uma extensão média no solo entre 0.01% e 0.02%. Isto pode indicar que para esta configuração da via-férrea, poderia ser benéfico assegurar extensões admissíveis no solo dentro deste intervalo.

Fez-se um estudo para um caso de uma areia com $E_0=160\text{MPa}$ e implementou-se um processo que tenta, de forma simples, aproximar a não linearidade do comportamento do solo com a extensão por corte sem recorrer a modelos não-lineares complexos. A resposta das componentes da via-férrea avaliada através do comportamento das travessas revela diferenças significativas nos deslocamentos e acelerações em função do modelo adoptado para a fundação.

Este trabalho mostra a importância do modelo da fundação de uma via-férrea na resposta da mesma e a adequação do estabelecimento de um nível de extensão admissível no solo, na concepção da estrutura da via-férrea.

REFERÊNCIAS

- Assimaki, D., Kausel, E., Whittle, A.J. (2000). "Model for dynamic shear modulus and damping for granular soils." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2000, 126(10):859–69.
- Degrade, G. e Lombaert, G.(2000). "High-speed train induced free field vibrations: In Situ measurements and numerical modelling." *Proceedings of the International Workshop Wave 2000, Wave Propagation, Moving Load, Vibration Reduction*, edited by N. Chouh and G. Schmid, Ruhr University, Bochum, Germany, pp. 29–41.
- Gomes Correia, A., (2004) "Características de deformabilidade dos solos que interessam à funcionabilidade das estruturas" *Revista de Geotecnia*, SPG nº 100, pp 103-122.
- Gomes Correia, A., Cunha, J. (2007). "Influência da deformação cíclica de solos de fundação no desempenho de uma via-férrea de alta velocidade." *Revista de Engenharia Civil da Universidade do Minho*, nº28, 73-86.
- Gomes Correia, A., Cunha, J., Marcelino, J., Caldeira, L., Varandas, J., Dimitrovová, Z., Antão, A. e Gonçalves da Silva, M. (2007). "Dynamic analysis of rail track for high speed trains. 2D approach." *Proceedings of the 5th International Workshop on Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering*, Guimarães, 461-472.
- Hung, H. H. e Yang, Y. B. (2001). "A Review of Researches on Ground-Borne Vibrations with Emphasis on those Induced by Trains." *Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A)* Vol.25, nº1, 1-16
- Ishibashi, I. e Zhang, X. (1993). "Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay." *Soils and Foundations*, 33(1), 182-191.
- Lopez-Caballero, F., Modaressi, A. e D'Aguiar, S. (2004). "Amélioration du modèle de comportement non linéaire existant dans le logiciel CyberQuake®". *Rapport D'avancement*, École Centrale Paris, Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux.
- Marcelino, J. (2007). "Modelo Bi-Dimensional para o Estudo das Vibrações Devidas a Comboios de Alta Velocidade", *Relatório LNEC*, Lisboa, Portugal.
- Santos, J. A. (1999). "Caracterização de solos através de ensaios dinâmicos e cíclicos de torção. Aplicação ao estudo do comportamento de estacas sob acções horizontais estáticas e dinâmicas." *Tese de Doutoramento*, IST.
- Seed, H. B. e Idriss, I. M. (1970). "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses." *Report EERC-70-10*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
- Seed H. B., Wong R. T., Idriss I. M. and Tokimatsu K. (1986). "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils." *Journal of Geotechnical Engineering - ASCE*, 112(11), 1016-1032.
- TNO DIANA (2005). *Displacement method ANAlyser*, cd-rom, versão 9, Building and Construction Research, Holanda.
- Vucetic M. e Dobry R. (1991). "Effect of soil plasticity on cyclic response." *Journal of Geotechnical Engineering - ASCE*, 117(1), 89-107.