

VIBRAÇÕES GERADAS POR COMBOIOS DE ALTA VELOCIDADE. UMA REVISÃO

Vibrations due to high-speed trains. A review

João Marcelino*

RESUMO – Em Portugal serão construídas, nos próximos anos, algumas centenas de quilómetros de vias férreas de alta velocidade. Em diversos países tem-se verificado que a conjugação de velocidades elevadas de circulação com determinadas características dos solos de fundação conduz a fenómenos de amplificação dinâmica das deformações resultantes da circulação dos comboios. As linhas de alta velocidade, em Portugal, terão inevitavelmente de atravessar zonas onde a velocidade de circulação se pode associar com as condições desfavoráveis das fundações criando os fenómenos dinâmicos referidos. O presente artigo apresenta a problemática da geração de vibrações devidas à circulação de comboios, uma revisão sucinta de alguns métodos existentes para a previsão e análise do fenómeno e analisa as medidas de mitigação existentes.

SYNOPSIS – In Portugal, during the next years, several hundreds of kilometers of high speed railway lines will be constructed. In some countries, it has been verified that the simultaneous occurrence of high speed circulation with certain foundation characteristics leads to dynamic amplification of the deformations. The high speed lines in Portugal will, inevitably, cross zones where the circulation speed can be associated with the conditions of the foundations favorable to create the dynamic amplification phenomena. The present article presents the problematic of the generation of vibrations due to the circulation of high speed trains. A brief revision of some of the existing prediction methods and countermeasures is presented.

PALAVRAS CHAVE – Propagação de vibrações, mitigação de vibrações, comboio de alta velocidade, modelação.

1 – INTRODUÇÃO

Em Portugal serão construídas, nos próximos anos, linhas ferroviárias de alta velocidade (AV) para efectuar não só a ligação entre as principais cidades nacionais, mas também, ligações a Espanha. Em 2003, na XIX Cimeira Luso Espanhola, foi reconhecida pelos dois países a grande importância sócio-económica de uma rede ibérica de alta velocidade que se integre nas redes Transeuropeias. No mesmo encontro, foram também acordados os eixos de ligação Portugal-Espanha. Tais eixos são: Porto-Vigo, Aveiro-Salamanca, Lisboa-Madrid e Faro-Huelva. Ficou ainda estabelecido que seria criada uma Comissão Mista, com membros nomeados pelos governos dos dois países, que estudaria os traçados mais adequados para os diversos eixos. Um dos objectivos principais é o de efectuar a ligação Lisboa-Madrid em 2h e 45min (MOPTH/MF, 2003). Mais recentemente na Cimeira Luso Espanhola de 2005, foi reafirmado o interesse nas diversas ligações, tendo-se acordado adicionalmente que a ligação Lisboa-Madrid deverá suportar tráfego misto (MOPTH/MF, 2005).

Não obstante a decisão e a oportunidade de uma rede de linhas de alta velocidade em Portugal estar muito dependente de condições político-económicas, é por demais evidente que tal terá de acontecer. A implementação de uma rede de AV em Portugal integra-se num dos projectos

*Investigador Principal com Habilitação. LNEC, Departamento de Geotecnia, Núcleo de Barragens e Obras de Aterro. E-mail: marcelino@lnec.pt

estruturantes da União Europeia que visa contribuir para o reordenamento do território, pretende aumentar a quota do transporte ferroviário e criar em Portugal padrões de mobilidade semelhantes aos restantes países europeus, permitindo adicionalmente ligar a rede ferroviária nacional à rede europeia, satisfazendo ainda padrões de interoperabilidade.

2 – VIBRAÇÕES DEVIDAS A COMBOIOS

2.1 – Mecanismos de geração de vibrações

A principal causa de geração de vibrações está associada com o movimento do campo de tensões resultante das cargas dos eixos dos comboios em movimento e com a resposta da superstrutura ferroviária e respectiva fundação a essas acções (Dawn e Stanworth, 1979).

Para além do movimento do campo de tensões, considerado como causa primária da geração de vibrações, há outras que contribuem para a geração de vibrações ou para a alteração das suas características. No Quadro 1 listam-se os principais factores que se relacionam com a geração de vibrações (Krylov, 2002; Hall, 2003).

Quadro 1 – Factores que afectam a geração de vibrações.

Ondas devidas à resposta estrutural	Vibração na ligação rodados-carril	Carris	Fundação
Cargas por eixo	Oscilações do veículo	Defeitos (ondulações)	Características das travessas
Geometria (espaçamento e distribuição de cargas)	Propriedades dinâmicas do bogie	Juntas	(espaçamento, rigidez, massa)
Velocidade	Defeitos dos rodados	Aparelhos de mudança de via	Características do balastro
	Desalinhamento dos motores	Curvas e inclinação	Características do solo de fundação

O comboio é constituído por um conjunto de veículos em que cada um compreende, por sua vez, um conjunto de massas ligadas entre si por suspensões. Para contabilizar de forma correcta a dinâmica do veículo, o modelo correspondente deve incluir as rodas, os bogies, a carruagem e os sistemas de suspensão que ligam entre si as diversas massas (Figura 1).

Cada um dos factores acima apresentados gera vibrações com determinadas características (comprimento de onda, frequência) que, em conjunto, compõem toda a gama de vibrações que resulta da circulação ferroviária.

Por exemplo, as irregularidades nos carris ou nos rodados, com um comprimento de onda λ , provocam, num comboio que circule a uma velocidade V , vibrações com uma frequência f , dada por:

$$f = \frac{V}{\lambda} \tag{1}$$

As frequências próprias de vibração dos diversos componentes do material circulante podem ser próximas das frequências geradas pela circulação do comboio, o que, naturalmente pode conduzir a fenómenos de amplificação das vibrações de forma mais ou menos importante, com as naturais consequências, quer em termos de segurança, quer em termos de conforto.

Por este motivo, um modelo completo para estudo da geração e propagação das vibrações deverá compreender, de forma integrada, os diversos elementos que intervêm no processo, ou seja, o veículo, a linha, a fundação, etc. Na prática, os modelos deste tipo são bastante complexos e, muitas vezes, analisam-se e contabilizam-se separadamente os diversos intervenientes no processo de geração e propagação das vibrações.

Se os defeitos nos carris ou nos rodados tiverem comprimentos da ordem dos 3 m e o comboio circular com uma velocidade da ordem dos 300 km/h, a vibração resultante desses defeitos tem uma frequência de cerca de 28 Hz. Estas frequências mais baixas são as que contêm mais energia e que se aproximam mais das frequências que podem causar problemas na própria infra-estrutura ferroviária.

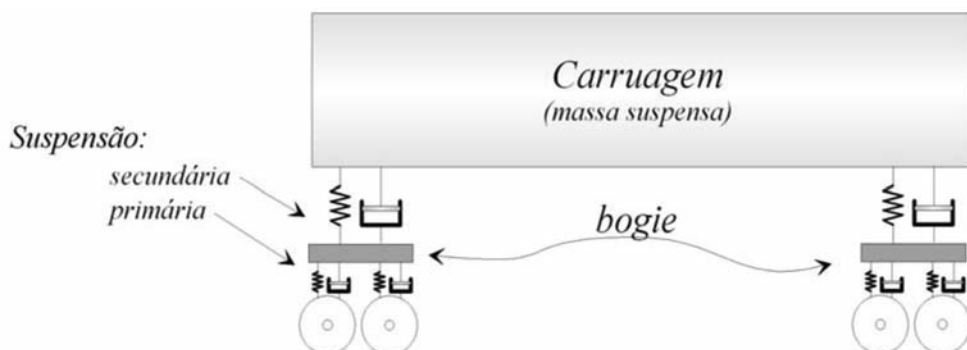


Fig. 1 – Modelo analógico de carruagem com rodados, bogies e suspensões.

2.2 – Efeitos das vibrações na segurança e nas infra-estruturas ferroviárias

Tendo em consideração a existência de vibrações devidas à passagem dos comboios, em particular dos comboios de alta velocidade, interessa perceber em que medida essas vibrações afectam o meio circundante da infra-estrutura ferroviária, a própria infra-estrutura, ou mesmo o material circulante.

Do ponto de vista ambiental, o aspecto predominante, ou pelo menos o mais perceptível, está relacionado com o ruído gerado pela circulação dos comboios.

Uma parte desse ruído tem origem aerodinâmica e está relacionado com o movimento das carruagens através do ar. Outra parcela do ruído pode ter origem no funcionamento dos motores do comboio. Esta última parcela é relativamente reduzida, uma vez que os comboios de alta velocidade são geralmente eléctricos e, consequentemente, geram pouco ruído em resultado do seu funcionamento. Uma terceira parcela de ruído tem origem no contacto entre os rodados e o carril em resultado das imperfeições existentes nestes elementos e, ainda, devido ao “arraste” que as superfícies metálicas sofrem em travagens ou em curva. Neste último caso, o ruído é do tipo “guincho” e é fortemente audível. O ruído que se gera devido ao contacto entre as superfícies é susceptível de se transmitir através da fundação e pode chegar aos edifícios vizinhos onde pode causar incomodidade ou danos estruturais ligeiros.

Alguns autores procuraram identificar as gamas de frequências em relação com o mecanismo de geração das vibrações (Hildebrand, 2004; Esveld, 2001). Segundo estes autores, a gama de fre-

quências mais relevantes em resultado do tráfego ferroviário situa-se abaixo dos 200 Hz. Acresce que, nas vibrações geradas pelos comboios, o maior conteúdo energético situa-se precisamente na gama de baixas frequências (< 20 Hz). As vibrações com estas frequências podem causar danos na própria infra-estrutura ferroviária danificando os carris ou o balastro, causar assentamentos devidos a cargas cíclicas no aterro ou na fundação, instabilizar taludes, ou mesmo danificar estruturas adjacentes.

Na gama de frequências dos 20 a 200 Hz, a parcela mais significativa é a que se situa abaixo dos 100 Hz, dado que, por um lado, são vibrações que ainda transportam uma energia significativa e, por outro, correspondem à gama de frequências que causa efeitos vibratórios sensíveis em lajes, paredes ou janelas.

No que respeita à circulação, a amplificação das vibrações, quando a velocidade do comboio se aproxima da velocidade de propagação das ondas de Rayleigh, pode causar incomodidade para os passageiros, ou em casos extremos, pôr em causa a estabilidade do próprio comboio. Por outro lado, há também um acréscimo, não desprezável, do consumo da energia que é necessário fornecer ao comboio. Baseados num modelo simplificado, Metrikine *et al.*, (2001) mostram que, do total da energia dissipada no movimento do comboio, entre 10 a 24% corresponde à energia gasta na propagação das ondas visco-elásticas.

A parcela restante corresponde à energia gasta por efeitos aerodinâmicos. Embora a primeira parcela seja relativamente pequena, os autores salientam que os cálculos foram efectuados com um modelo simples, que não contabiliza todos os factores que afectam as vibrações e, consequentemente, a dissipação de energia.

A infra-estrutura ferroviária está sujeita a assentamentos devidos ao seu peso próprio e em resultado da sobrecarga devida à passagem dos comboios. Estes últimos são resultantes do carregamento cíclico imposto pelas composições em circulação. Em geral, admite-se que o assentamento estabiliza ao fim de 10^5 ciclos de carga. No entanto, o efeito de amplificação da amplitude dos movimentos devida ao efeito dinâmico pode agravar o fenómeno de assentamento. Por outro lado, as vias férreas balastradas necessitam, periodicamente de operações de ataque pesado, após as quais a via assume a sua posição original. Segundo Anderson e Key (2000), as operações de manutenção pesada tornam-se cada vez mais frequentes, designando-se por “memória do balastro” o facto que determina o incremento da necessidade destas intervenções. Este aspecto é de grande importância do ponto de vista da exploração das linhas de caminho de ferro. Por exemplo, de acordo com as autoridades chinesas de caminhos de ferro, 75% dos trabalhos diários de manutenção na plataforma ferroviária são devidos ao balastro e à sua deformação (Zhai *et al.*, 2004).

Para além dos problemas relacionados com a manutenção da infra-estrutura ferroviária, dos problemas ambientais relacionados com o ruído ou com a propagação de vibrações perceptíveis pelas pessoas e dos problemas de segurança imediatos no que respeita à circulação, é necessário também considerar os problemas de segurança com respeito aos aterros e respectivas fundações. Os solos apresentam um comportamento marcadamente não linear, com variações importantes de deformabilidade para níveis de deformação elevados. Por outro lado, as acções cíclicas, tais como aquelas que podem ser causadas e consideravelmente ampliadas pela circulação dos comboios a velocidades elevadas, podem causar acréscimos de pressão intersticial nos aterros e respectivas fundações com as consequentes implicações ao nível da segurança.

Ainda no que diz respeito à segurança, reconhecida a existência de uma velocidade para as quais o efeito de amplificação das deformações (velocidade crítica) se faz sentir com maior intensidade, interessa conhecer a velocidade máxima a que os comboios podem circular em condições de segurança. Alguns autores (Heelis *et al.*, 1999) sugerem que a velocidade máxima de circulação

deve ter uma reserva de 30% relativamente à velocidade crítica. Embora o estabelecimento da velocidade máxima tenha subjacente a limitação das deformações induzidas pela circulação a essa velocidade, e possa ser considerada como uma primeira aproximação, um critério mais objectivo deve ter em consideração a amplitude das vibrações e os seus efeitos. Por exemplo, Hung *et al.*, (2004), na comparação da eficiência de várias contramedidas de propagação de vibrações, definem um coeficiente de redução do nível de vibração (CRV) por:

$$CRV[dB] = -20 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (2)$$

onde P1 e P2 representam a resposta do sistema com e sem medidas de mitigação, respectivamente. Os valores de P1 e P2 podem representar deslocamentos, velocidades ou acelerações. Um critério deste tipo é mais objectivo e adequado ao estabelecimento de uma “velocidade de segurança”.

3 – MODELOS DE PREVISÃO E ANÁLISE

Apesar de o fenómeno de amplificação das vibrações ser já conhecido em termos teóricos desde 1927 por Timoshenko Madshus e Kaynia (2000) e ter sido relatado há quatro décadas por Filippov (1961), os grandes desenvolvimentos nesta área são recentes e ficam a dever-se, fundamentalmente ao aumento da velocidade de circulação dos comboios. Em alguns casos relatados da bibliografia houve a necessidade de reduzir substancialmente a velocidade de circulação enquanto não se implementaram medidas de reforço da infra-estrutura ferroviária e sua fundação.

A percepção de vibrações causadas pelo tráfego de comboios era predo-minante-mente resultante da circulação de comboios de mercadorias com cargas por eixo muito elevadas, embora circulando a velocidades relativamente baixas (Jones e Block (1996) e Sheng *et al.*, 1999). Recentemente, com os desenvolvimentos associados às linhas de alta velocidade, a preocupação com as vibrações resultantes da circulação de comboios mais ligeiros, mas que circulam a velocidades elevadas, ganhou também importância.

A análise dos efeitos da circulação dos comboios tem de ser feita recorrendo a modelos realistas que permitam ter em consideração os diferentes factores responsáveis pela geração de vibrações, bem como os factores que afectam a sua propagação. Os modelos devem permitir a inclusão explícita ou implícita dos diversos elementos que compõem a superestrutura ferroviária e a respectiva fundação.

Na superestrutura ferroviária incluem-se os diversos elementos acima da fundação: os carris, os elementos de suporte dos carris, as travessas, o balastro, as diversas camadas que compõem a fundação do balastro e, quando aplicável, o aterro ferroviário.

A fundação deve, por sua vez, permitir a consideração de diversas camadas de solos com diferentes características, sobrejacentes a um maciço rochoso ou solos de características que não influenciem a propagação das ondas de corte.

Os modelos de análise e previsão da transmissão de vibrações devem, na medida do possível, ser capazes de considerar as diversas fases do processo, nomeadamente a geração, a transmissão e a recepção das vibrações. Para além disso, os modelos devem permitir o estudo de eventuais medidas de mitigação, nomeadamente pela intersecção das mesmas ou pela alteração das suas características.

Existem diversas abordagens do fenómeno de propagação de vibrações devidas ao tráfego ferroviário. Essas abordagens podem ser divididas, para simplicidade de tratamento, em quatro categorias, que devem ser encaradas como complementares:

- analíticas;
- baseadas em medições *in situ*;
- empíricas;
- modelação numérica.

Os modelos analíticos, de solução exacta, estão naturalmente limitados pelas múltiplas simplificações que é necessário fazer por forma a estabelecer um conjunto de equações que represente o sistema de geração, propagação e recepção das vibrações. São, no entanto, muito úteis, pois permitem a compreensão do fenómeno e, através do estudo de situações simples, permitem também a calibração/verificação de modelos mais complexos nomeadamente os modelos numéricos. Os modelos analíticos e mesmo algumas das implementações dos modelos numéricos baseiam-se na possibilidade de estudar a resposta dinâmica da fundação ao conjunto de cargas que derivam da passagem do comboio, considerando cada carga isoladamente das restantes. Isto corresponde a admitir como válido o princípio da sobreposição dos efeitos ou, por outras palavras, a admitir que o sistema é elástico linear. A resposta do modelo à circulação do comboio é obtida pela soma das contribuições dos vários eixos do comboio, tendo em atenção a distribuição de cargas correspondentes e as respectivas posições na composição circulante.

Os modelos baseados nas medições *in situ* destinam-se a conhecer a resposta real da fundação tendo em consideração as condições de um determinado local. Estes modelos baseiam-se na montagem de um sistema relativamente complexo de dispositivos de medição da resposta da superestrutura ferroviária, fundação e eventuais estruturas adjacentes. A resposta é medida em termos de deslocamentos, velocidades ou acelerações recorrendo à instalação de extensómetros, geofones ou acelerómetros, sendo que estes últimos têm provado apresentar melhores resultados na prática. A obtenção das grandezas relevantes para o estudo do problema, é feita convertendo as grandezas medidas nas pretendidas, através de derivação ou integração numérica dos sinais. Para além disso torna-se ainda fundamental recorrer a algoritmos de processamento digital de sinais, nomeadamente para filtrar os sinais e retirar o ruído que apresentam ou para melhorar a sua representação, quer no domínio do tempo quer no domínio da frequência, Marcelino e Monteiro (2006).

As medições *in situ* devem também ser encaradas como um meio para obtenção de parâmetros que permita alimentar e calibrar os modelos matemáticos.

Existem diversos casos relatados na bibliografia que dão conta de campanhas de medição dos efeitos da passagem de comboios, sendo de salientar os realizados na Suécia em Ledsgaard e em Malmö (Hall, 2000; Smekal e Berggren, 2002), e os da homologação da linha Bruxelas-Paris (Degrande e Schillmans, 2001).

Para além destas campanhas são relatadas outras, por exemplo na linha Bruxelas-Colónia (Kogut *et al.*, 2003), na Holanda, na linha que une Amesterdão a Utrecht, e na Alemanha, para o comboio ICE (Degrande, *op. cit.*).

Outras referências, menos pormenorizadas, são feitas relativamente a campanhas de medições realizadas em Itália e em Inglaterra, França, Reino Unido e Suíça (Kaynia *et al.*, 2000 e Sheng *et al.*, 2003).

Os modelos empíricos são bastante limitados na medida em que é difícil conceber um modelo deste tipo que contabilize todos os factores que intervêm no fenómeno complexo de geração e pro -

pagação das vibrações. No entanto existem algumas abordagens que permitem a compreensão parcial de alguns dos factores que influenciam a resposta da ferrovia à circulação a alta velocidade. Por exemplo, a deflexão máxima expectável para uma carga isolada, no caso dinâmico, pode ser aproximada pela expressão (Esvel, 2001):

$$w_{dinâmico} = w_{estático} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{V_{Cr}}\right)^2}} \quad (3)$$

Esta expressão, apenas válida para o caso não amortecido dá estimativas razoáveis para velocidades de circulação inferiores a 80% da velocidade crítica.

Outros exemplos de expressões empíricas encontram-se na regulamentação de alguns países. Por exemplo, na regulamentação japonesa, as cargas dinâmicas devidas aos rodados podem ser calculadas a partir das cargas estáticas por (Shin *et al.*, 2002):

$$P'_w = P_w \times i \times (1 + c) \quad (4)$$

onde P'_w representa a carga dinâmica em cada rodado; P_w a carga estática e

$$i = 1 + 0,3 \left(\frac{V}{100} \right) \quad (5)$$

é o factor de impacto dinâmico, onde V representa a velocidade de circulação em km/h e c um coeficiente variável entre 0,2 e 0,4, com um valor médio de 0,3. A distribuição de cargas debaixo de cada travessa não é uniforme considerando-se simplifcadamente a distribuição representada na Figura 2.

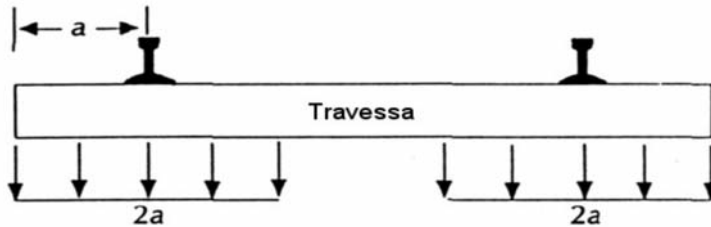


Fig. 2 – Distribuição de cargas debaixo das travessas.

Na mesma regulamentação considera-se também uma determinada distribuição de cargas entre as travessas, admitindo-se que uma parcela variável entre 40 e 60% da carga em cada travessa é transmitida para as travessas adjacentes.

No que respeita à possibilidade da fundação ser constituída por mais de um material, alguns autores (por exemplo, Heelis *et al.*, 1999) sugerem que, em camadas de solo caracterizadas por módulos de reacção k_0, k_1, \dots, k_n , o módulo equivalente da associação desses materiais k^* seja, aproximadamente, dado por:

$$k^* = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n}} \quad (6)$$

A expressão anterior dá resultados pouco coerentes dado que, por exemplo, para duas camadas iguais reduz o módulo de reacção da fundação para metade. Corrigindo a equação anterior obtém-se:

$$k^* = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\frac{h_1}{k_1} + \frac{h_2}{k_2} + \dots + \frac{h_n}{k_n}} \quad (7)$$

expressão correspondente à associação em série de camadas com espessuras h_i e com rigidez diferente, e que já conduz a valores coerentes.

Para ultrapassar as limitações das abordagens analíticas, experimentais ou empíricas surge, naturalmente, a necessidade de considerar modelos numéricos que permitem, pelo menos em princípio, simular de forma mais realista e completa o fenómeno de geração/propagação/recepção de vibrações.

O grande advento dos métodos numéricos está associado ao desenvolvimento dos computadores digitais desde a década de 70. Os métodos numéricos dos elementos finitos, das diferenças finitas ou dos elementos de fronteira passaram a ser ferramentas úteis e viáveis na resolução de muitos problemas, nomeadamente em problemas dinâmicos. Cada método apresenta determinadas particularidades e especificidades que os tornam mais adequados para o estudo de determinadas situações particulares no que concerne à modelação das vibrações geradas pelo tráfego ferroviário.

O método dos elementos de fronteira é especialmente adequado na modelação de semi-espacos relativamente homogéneos e permite contabilizar de forma adequada o amortecimento por radiação nas fronteiras situadas a grande distância. Por outro lado, não é muito adequado à resolução de problemas com irregularidades, quer geométricas, quer mecânicas, como as que ocorrem, naturalmente, na maioria dos casos reais.

O método dos elementos finitos (MEF), pela sua natureza, é especialmente indicado para a modelação de geometrias arbitrárias, com elevado número de irregularidades, sendo por isso adequado para modelar as zonas próximas da fonte de geração de vibrações, para as zonas receptoras e para a propagação entre as duas zonas. A maior limitação deste método prende-se precisamente com a modelação dos semi-espacos infinitos. Os elementos finitos não são especialmente adequados para modelar de forma correcta os problemas de amortecimento por radiação, dado que a modelação do meio, mesmo infinito, é feita à custa de elementos finitos, limitados no espaço. Uma forma de contornar esta limitação recorrendo exclusivamente ao MEF consiste no uso de elementos infinitos (Bettess, 1992; Sitharam e Vijay Kumar (1998); Yang *et al.*, 2003).

Por vezes, nos pacotes comerciais pode não estar contemplado o tipo de elemento infinito que permite modelar as fronteiras sem reflexão das ondas. Nesses casos, podem-se simular essas fronteiras considerando diversas camadas de elementos de dimensão e amortecimento crescentes. Segundo Gardien e Stuit (2003), a não consideração deste tipo de fronteiras pode levar a sobrestimar o nível de deformação por um factor de 2 vezes.

O problema da extensão da malha até grandes distâncias para ultrapassar o problema da radiação nas fronteiras é mais sentido para a propagação de ondas de baixa frequência e maiores comprimentos de onda. Por outro lado, a dimensão dos elementos finitos deve ser inferior ao menor dos comprimentos de onda o que, no caso de propagação de ondas de maior frequência, implica necessariamente malhas com um elevado número de elementos. A conjugação das duas condições para problemas onde se propague um espectro relativamente alargado de frequências leva a que as

malhas de elementos finitos, em especial as tridimensionais, possam ter um número muito elevado de elementos e portanto sejam muito dispendiosas em termos de tempo de cálculo.

Outra abordagem aplicada em diversas referências encontradas na bibliografia (Schnack e Turke, 1997; Perera e Alarcón, 1997) consiste no método híbrido, onde se conjuga a utilização do MEF usado na modelação do campo próximo com o método dos elementos de fronteira, usado na modelação do campo afastado.

A propagação das vibrações devidas à circulação dos comboios é um problema tridimensional e esse aspecto é condicionante na dificuldade associada à sua modelação através de modelos matemáticos mesmo no caso de modelos numéricos. De facto, embora do ponto de vista formal a modelação tridimensional possa ser apenas um pouco mais complexa que a bidimensional e ser perfeitamente acessível recorrendo aos sistemas de computação actuais, na prática as dificuldades associadas à modelação 3D são muito significativas.

Um dos problemas tem a ver com o custo computacional associado à resolução de problemas tridimensionais. De facto, a cada ponto nodal passam a estar associados três deslocamentos, segundo os três eixos do espaço, ao contrário dos problemas bidimensionais onde apenas existem dois deslocamentos a considerar. Na resolução dos sistemas de equações, na preparação das matrizes necessárias à formulação do método os tempos de cálculo são, portanto, muito acrescidos.

Pelos motivos acima apontados, a modelação da propagação de vibrações a três dimensões é um processo numérico de alguma complexidade e bastante moroso sendo, normalmente, feitas diversas simplificações que compreendem a geometria da superestrutura ferroviária, os sistemas de carregamento, o tipo de simetria do modelo, entre outras.

Interessa portanto conhecer em que medida é que é possível estabelecer simplificações nomeadamente recorrendo a casos especiais de simetria, nomeadamente à simetria de estado plano de deformação.

Segundo alguns autores (Paolucci *et al.* 2003), as análises bidimensionais baseadas na simetrias do estado plano de deformação, podem conduzir a alguns resultados úteis, mas, a sua validade limita-se às zonas mais próximas do aterro sendo o erro crescente com a distância ao mesmo, atingindo valores cerca de uma ordem de magnitude superiores aos medidos.

As cargas devidas aos comboios em circulação apesar de localmente serem pontuais, podem, em certas condições ser assimiladas a cargas distribuídas. Segundo Gutowski e Dym (1976), a aproximação de carga linear em movimento para modelar a passagem de um comboio é válida desde que o ponto de observação das vibrações se situe a uma distância inferior a L_c / π , sendo L_c o comprimento do comboio. Esta aproximação apenas se aplica para velocidades de circulação (V) inferiores à velocidade crítica. Se, pelo contrário aquelas velocidades forem próximas, há lugar a um fenómeno de concentração de vibrações segundo um cone (cone de Mach) e as condições próximas de estado plano de deformação são francamente ultrapassadas.

Um desenvolvimento potencialmente interessante é aquele que tira partido de a geometria do problema ser, em geral, repetitiva segundo o eixo longitudinal, não obstante o carregamento devido ao comboio não o ser.

Nesta simetria especial, que se designa por 2.5D em analogia aos termos mais ou menos consagrados de 2D para análises bidimensionais ou 3D para problemas tridimensionais (Yang e Hung,

2001) consideram-se três graus de liberdade (GL) por cada ponto nodal. Dois desses GL são os habituais num problema em simetria plana e descrevem o campo de deslocamentos no plano da análise (x e y na Figura 3). O terceiro GL é perpendicular ao plano e descreve a componente do campo de deslocamentos segundo o eixo z e tem em consideração a transmissão das vibrações no plano perpendicular ao da análise. No caso de um estado plano de deformação, a componente z dos deslocamentos (e das deformações) é sempre nula, mas nesta formulação esses deslocamentos podem ser diferentes de zero.

Os elementos finitos considerados nesta formulação comportam-se no plano x, y como os elementos finitos bidimensionais, mas consideram a extensão da geometria até ao infinito no plano perpendicular (tal como num estado plano de deformação) e permitem o cálculo de deslocamentos segundo esta direção.

No modelo proposto pelos autores, o campo próximo é modelado através de elementos finitos, podendo ter em consideração a existência de estruturas fora da plataforma ferroviária ou a estratificação que normalmente ocorre em camadas aluvionares. O campo afastado é modelado através de elementos infinitos que, não sendo tão precisos como os elementos de fronteira, baseiam-se também nos conceitos de funções de forma e de funções de interpolação sendo, portanto, mais fáceis de implementar em programas de elementos finitos existentes.

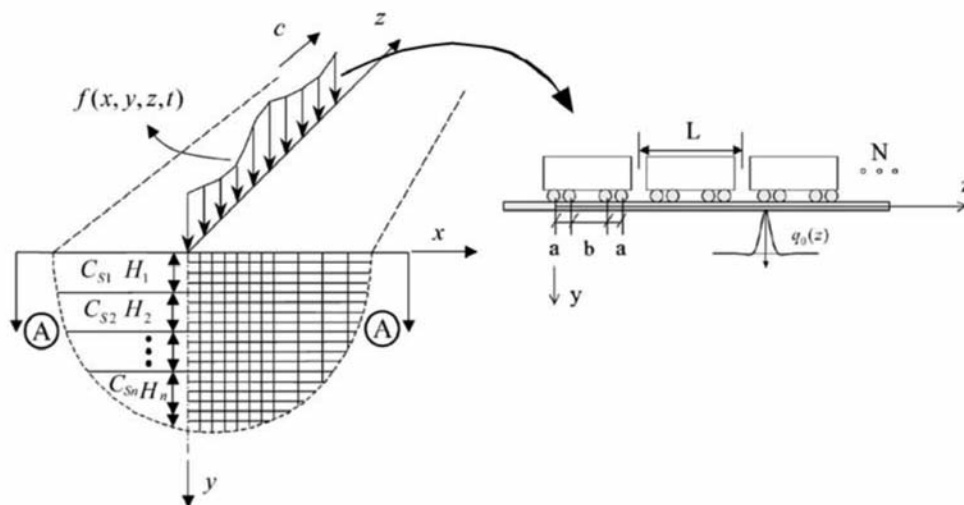


Fig. 3 – Representação esquemática da geometria do problema e do sistema de cargas (Yang *et al.*, 2003).

Para além dos modelos acima descritos, baseados normalmente no método dos elementos finitos, das diferenças finitas, dos elementos de fronteira ou de alguma combinação de diversos métodos, existem outros modelos que permitem a compreensão do fenómeno de propagação das vibrações e, dentro de determinadas simplificações, fazer algumas previsões. Um dos modelos que tem sido usado mais frequentemente, pela sua simplicidade, é o de uma viga assente numa fundação elástica (Figura 4), designado por “viga de Winkler”. Neste modelo, a superestrutura ferroviária (carris, travessas, balastro e sub-balastro) são assimilados a uma viga de características elásticas e geométricas traduzidas por um módulo de elasticidade E e por um momento de inércia I . A fundação, incluindo um eventual aterro, são modelados por um conjunto de molas de rigidez k e um conjunto de amortecedores de viscosidade c .

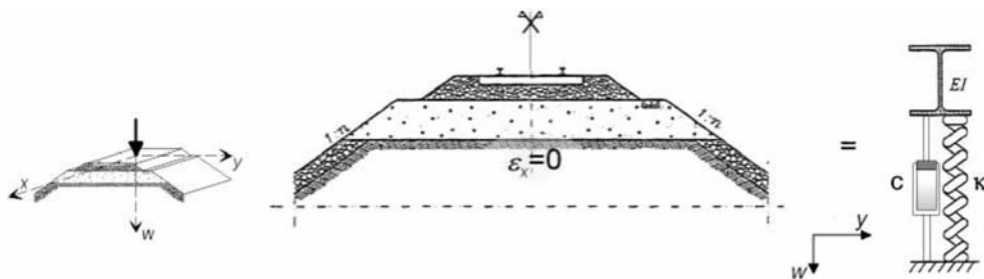


Fig. 4 – Modelo de um aterro ferroviário e respectivo modelo de viga de Winkler (adaptado de Hall, 2000).

A equação diferencial que traduz a deformação da viga para uma carga em movimento incluindo as forças de inércia é dada por:

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial w}{\partial t} + kw = q(t, x) \quad (8)$$

onde m representa a massa da viga por unidade de comprimento, e $q(t, x)$ a carga aplicada na viga que, em geral, depende da coordenada x e do tempo t .

O valor do módulo de reacção k representa a carga (pressão) que se gera na fundação para um deslocamento unitário, vertical, na viga. A determinação deste valor não é consensual. De facto, a determinação do valor de k varia consoante o que se considera ser a superestrutura (ou a viga) e aquilo que se considera ser fundação. Em primeira análise pode-se considerar a proposta de Biot (1937):

$$k = 1,23 \left[\frac{E_s b^4}{(1 - \nu_s^2) EI} \right]^{0,11} \frac{E_s}{(1 - \nu_s^2)} \quad (9)$$

onde E_s , ν_s representam as características elásticas do solo, EI a rigidez à flexão da viga equivalente e b corresponde a metade da sua largura. Outro processo adequado para a determinação do módulo de reacção do solo passa pela realização de uma análise pelo método dos elementos finitos específica para esse efeito. Através deste processo é possível considerar de forma mais correcta, por exemplo, as diversas camadas que compõem a fundação e, além disso, fica resolvida a ambiguidade na definição da “viga” e da “fundação”.

Admitindo que a carga é constante em magnitude (Q) mas que se encontra em movimento com velocidade V_0 , a Eq. 8 pode ser escrita por:

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial w}{\partial t} + kw = Q\delta(x - V_0 t) \quad (10)$$

A equação anterior pode ser mais facilmente resolvida num referencial em movimento com a mesma velocidade da carga. Seja:

$$s = \lambda(x - V_0 t) \quad (11)$$

onde λ representa o inverso do comprimento característico da viga dado por;

$$\lambda = \frac{1}{L} = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \quad (12)$$

Nestas condições, e considerando a mudança de referencial, a Eq. 10 pode ser escrita como:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial s^4} + 4\alpha^2 \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} - 8\alpha\beta \frac{\partial w}{\partial t} + 4w = Q\delta(s) \quad (13)$$

onde,

$$\alpha = \frac{V_0}{2\lambda} \sqrt{\frac{m}{EI}} \quad (14)$$

representa a relação entre a velocidade de circulação da carga e a velocidade crítica, definida de seguida, e

$$\beta = \frac{c}{2m} \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (15)$$

a relação entre o amortecimento e o amortecimento crítico.

A solução, nestas condições, mas considerando uma fundação elástica, sem amortecimento ($c = 0$ e portanto $\beta = 0$) foi apresentada por Kenney (1954). Na solução apresentada, Kenney determinou a existência de uma velocidade crítica para a qual as deformações na viga se tornariam infinitas, isto é, em que ocorre o fenómeno de ressonância. Essa velocidade corresponde exactamente à velocidade de propagação das ondas na viga (Hung e Yang, 2001), sendo dada por:

$$V_{Cr} = \sqrt[4]{4k \frac{EI}{m^2}} \quad (16)$$

Para velocidades V_0 inferiores à velocidade crítica, as deformações mais elevadas situam-se na proximidade (ou mesmo debaixo) do ponto de aplicação da carga. Para velocidades V_0 superiores a V_{Cr} as deformações mais elevadas ocorrem antes do ponto de aplicação da carga. Por outro lado, as deformações à frente da carga apresentam menores comprimentos de onda e menores amplitudes que aquelas que se situam aquém da carga (Figura 5). Este fenómeno é conhecido por “efeito de Doppler”. Este efeito traduz-se por uma alteração da frequência das ondas que viajam à frente ou atrás da carga. Se V_0 for a velocidade de circulação da carga e V_{Cr} a velocidade de propagação das ondas no solo, a alteração da frequência (f) das ondas, não havendo amortecimento, é dada por:

$$f = \frac{f_0}{1 \pm \frac{V_0}{V_{Cr}}} \quad (17)$$

Quando a velocidade V_0 , da carga, é superior à velocidade crítica de propagação das ondas, a frequência f , detectada pelo observador estático é, de acordo com a Eq. 17, negativa, o que implica que, teoricamente, não há propagação de vibrações à frente da carga (Yang *et al.*, 2003). Na solução da equação da viga de Winkler, para valores crescentes de α , as amplitudes obtidas à frente da carga são progressivamente mais reduzidas, indicando um fenómeno semelhante (Figura 5).

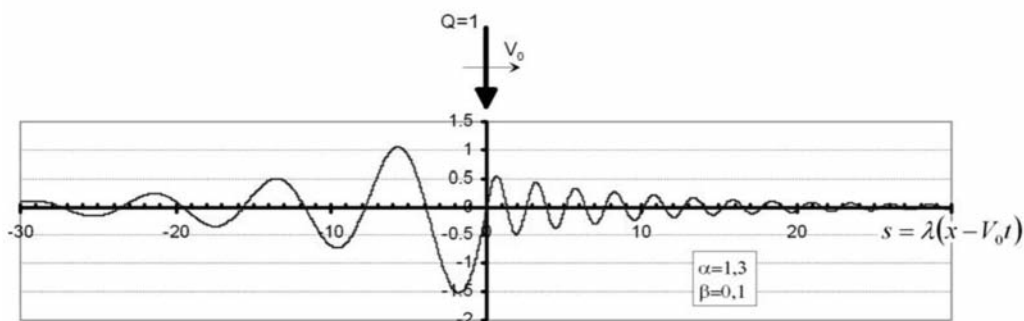


Fig. 5 – Propagação das vibrações no modelo da viga de Winkler e efeito de Doppler.

A solução analítica da equação mais geral, considerando o amortecimento devido ao comportamento elastoplástico da fundação, é mais complexa. Kenney (*op. cit.*) apresenta também a solução para este caso. Em alternativa, é possível considerar a solução numérica da equação, por exemplo, através do método das diferenças finitas. Na Figura 6 apresentam-se os deslocamentos calculados através da resolução numérica da equação para diversos valores de velocidade de circulação da carga relativamente à velocidade crítica ($\alpha = V_0/V_{Cr}$) em conjunto com diversos valores do amortecimento em comparação com o amortecimento crítico (β). Os deslocamentos desenhados encontram-se normalizados relativamente ao deslocamento obtido para $\alpha = 0$ e $\beta = 0$.

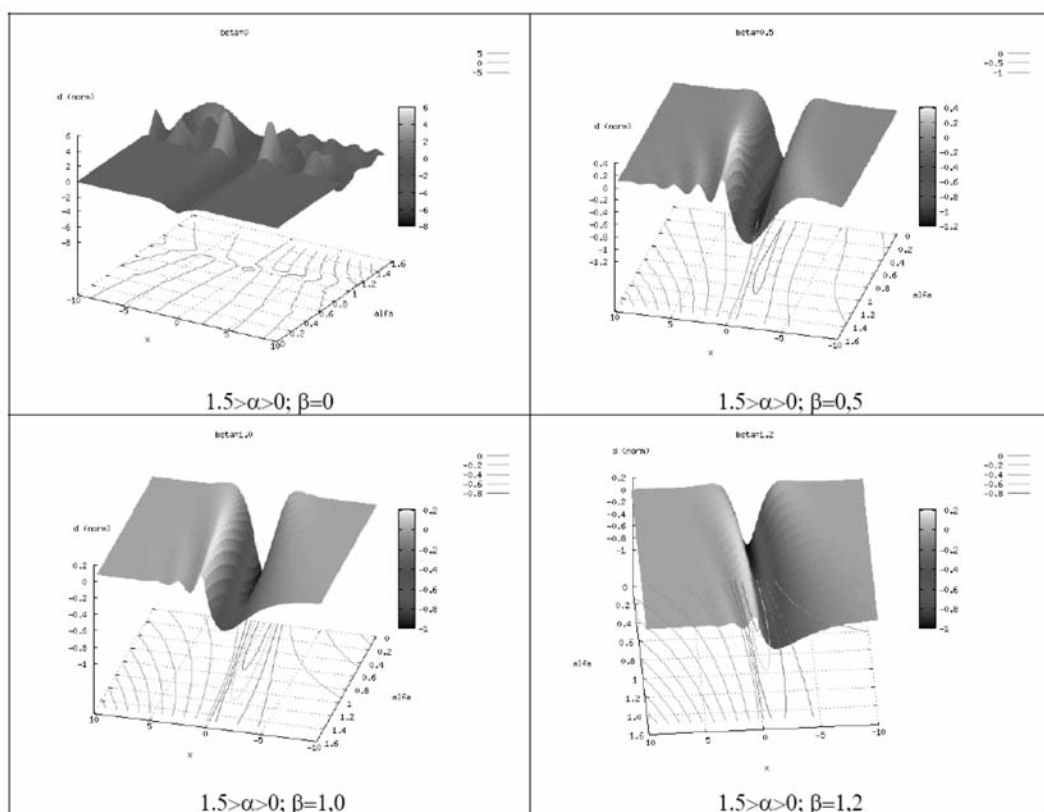


Fig. 6 – Solução da viga de Winkler para diversos valores de α e β .

Da análise das figuras é bastante evidente o fenómeno de amplificação que se processa para valores de $\alpha \approx 1$ no caso não amortecido ($\beta = 0$), como se verifica no primeiro diagrama do conjunto de figuras. Note-se, porém, que, para evitar os valores infinitos obtidos para $\alpha = 1$, no caso não amortecido, se considerou $\alpha \approx 0,99$.

Verifica-se, ainda, que, quando há amortecimento ($\beta \neq 0$), a deflexão máxima se situa antes do ponto de aplicação da carga sendo o desvio tanto maior quanto maior for o valor do amortecimento. De igual forma, para $\alpha > 1$ a deflexão máxima ocorre antes da carga, dado que as deformações da viga não conseguem acompanhar a velocidade da carga.

Na Figura 7 apresenta-se o diagrama onde, para diversas relações entre a velocidade de circulação da carga e a velocidade crítica, se pode determinar a amplificação dinâmica, de acordo com a solução da Eq. 13, para diversos valores de amortecimento.

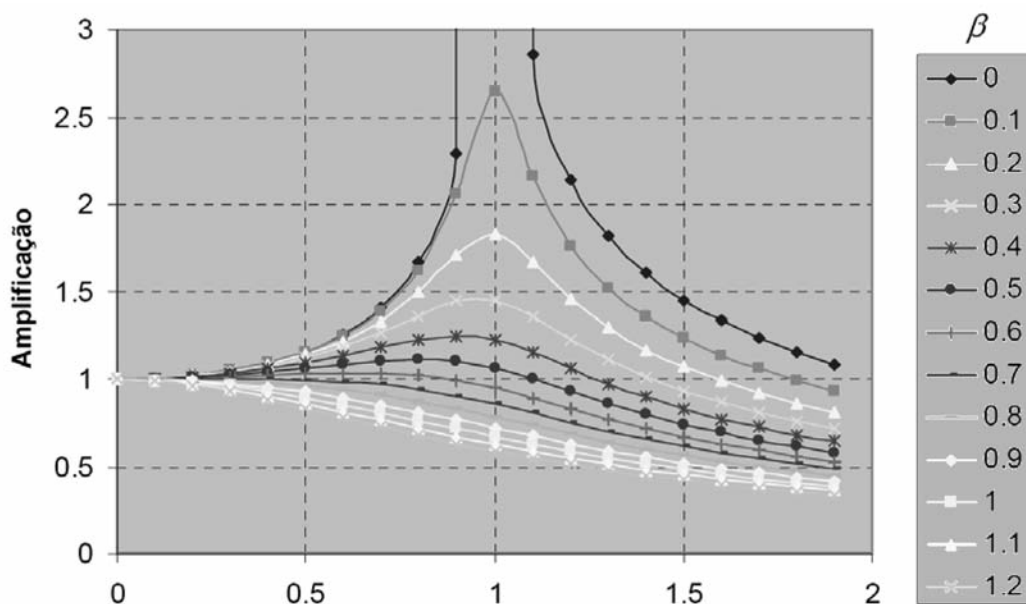


Fig. 7 – Amplificação dinâmica versus factor velocidade (α) para diversos valores do factor de amortecimento (β).

Apesar das soluções analíticas baseadas no modelo da viga de Winkler serem importantes na compreensão e descrição do fenómeno de propagação de vibrações, elas são também, naturalmente, limitadas. Assim, estes modelos padecem das mesmas limitações que praticamente todos os modelos analíticos, estando por isso limitados a casos simples, quer em termos de geometria, quer em termos do comportamento dos materiais. Por outro lado, pela sua formulação, os modelos baseados na viga de Winkler são bidimensionais, e apenas visam descrever a linha central do modelo (eixo de simetria da Figura 4), não havendo qualquer previsão quanto ao sentido transversal ao deslocamento.

Os mecanismos de geração de vibrações considerados nestes modelos são apenas os que resultam da resposta da estrutura ferroviária ao movimento do campo de tensões (Quadro 1), não considerando outros aspectos importantes do processo de geração de vibrações, nomeadamente as cargas dinâmicas devidas às oscilações das diversas massas do comboio.

No que respeita ao comportamento da fundação, verificam-se outras importantes limitações. Assim, por exemplo, no modelo da viga de Winkler apoiada num meio visco-elástico, a resposta de cada conjunto mola - amortecedor que representa a fundação é independente das restantes, contudo, essa situação é pouco representativa do comportamento real dos solos que constituem os aterros ou a fundação, onde existe interacção entre as diversas zonas da fundação.

Finalmente, outra importante limitação da solução analítica deste modelo tem a ver com o facto de não se contabilizar o comportamento não linear dos materiais de fundação e as suas características de material multifásico, o que leva a grandes dificuldades na obtenção dos parâmetros necessários para alimentar o modelo. Por exemplo, Hall (2000) determinou ser necessário reduzir os parâmetros EI da viga de Winkler e o parâmetro k do solo, por forma a ajustar as previsões do modelo analítico às medições efectuadas para o comboio X2000 na linha sueca em Ledsgaard. Este autor determinou ser necessário reduzir a rigidez de flexão da viga por um factor de 4 e a rigidez da fundação por um factor de 11, relativamente aos valores calculados com base na geometria e nos parâmetros determinados experimentalmente. Refira-se, porém, que as previsões analíticas efectuadas por este autor não contabilizaram os efeitos dinâmicos (amortecimento e inércia), isto é, limitaram a solução da Eq. 13 ao caso em que $\alpha = \beta = 0$.

Para ultrapassar a limitação do comportamento elástico e da constância dos diversos parâmetros intervenientes na Eq. 13, necessária para a obtenção de uma solução analítica, é possível, considerando o desenvolvimento em diferenças finitas ou a solução através de elementos finitos, calcular a solução, desde que se disponha de leis que permitam estimar a variação de E , k ou c com, por exemplo, a deformação.

Para além dos modelos de viga simples, ou de fundação homogénea, alguns autores têm procurado introduzir variantes do modelo de viga de Winkler. Frýba e Yoshikawa (1998) consideram o modelo de uma viga de Winkler assente numa fundação com um módulo de reacção $k(x)$ variável:

$$k(x) = k^* (1 + \varepsilon(x)) \quad (18)$$

onde k^* representa o valor nominal do módulo de reacção da fundação e $\varepsilon(x)$ uma função adimensional de incerteza que define os desvios do valor de $k(x)$ em relação a k^* .

Outro desenvolvimento de grande interesse é apresentado por Sheng *et al.*, (1999) e Sheng *et al.*, (1999a). No modelo proposto, os autores consideram a possibilidade de a fundação incluir, para além do semi-espaço infinito, tal como os demais modelos baseados na solução de Winkler, uma série de camadas de comportamento visco-elástico, sobrejacentes àquele espaço, o que permite modelar fundações estratificadas tal como acontece, frequentemente, nas fundações das vias férreas. Mais recentemente (Sheng *et al.*, 2003), o modelo é estendido de forma a, na geração das vibrações, se considerar em simultâneo o mecanismo resultante do movimento do campo de tensões em conjunto com a dinâmica do veículo. Segundo os autores, este factor é da maior importância na geração de vibrações, nomeadamente para velocidades de circulação inferiores à velocidade crítica.

Através da resolução conjunta das equações do modelo é possível obter soluções onde se pode analisar a influência das diversas camadas do solo, nomeadamente através da formação de mais de um “cone” de Mach, correspondendo cada um a cada camada de solo. Outro aspecto que o modelo permite verificar é a propagação de ondas à frente da carga, por acção da rigidez (e consequentemente da maior velocidade de propagação de ondas) dos carris (Figura 8).

Os modelos analíticos mais complexos, nomeadamente os que incluem os diversos elementos da estrutura ferroviária, têm permitido prever a existência de uma velocidade crítica mais baixa que

a que deriva do modelo mais simples da viga de Winkler. Por exemplo, Labra (1975) verificou que os efeitos de amplificação podem fazer-se sentir de forma igualmente sensível para velocidades de circulação inferiores à velocidade das ondas Rayleigh, nomeadamente quando os carris estão sujeitos a tensões axiais de compressão como é o caso por exemplo, das devidas às variações térmicas.

Os diversos modelos analíticos acima referidos baseiam-se na possibilidade de estudar o efeito do comboio sobre a fundação individualizando o efeito de cada carga, e analisando a resposta da estrutura ferroviária a essa carga, considerada como separada das restantes. De acordo com esta suposição, o efeito do comboio pode ser obtido pela soma das contribuições de cada um dos eixos. Assim, a história dos deslocamentos ($w(t)$), velocidades ($v(t)$) e acelerações ($a(t)$) é obtida pela soma de cada uma dessas grandezas, para cada um dos eixos que constituem o comboio.

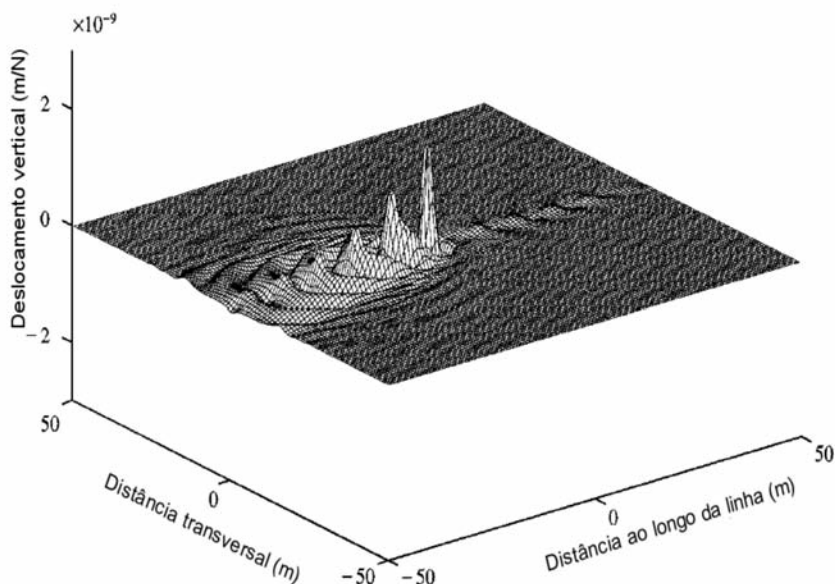


Fig. 8 – Resposta vertical da superfície do solo devido à excitação de uma carga com uma frequência de 40 Hz à velocidade de 150 m/s (adaptado de Sheng *et al.*, 1999)

Para conhecer a resposta para um comboio “real” torna-se necessário conhecer a distribuição de cargas (valor e posição) para esse comboio e a correspondente velocidade de circulação. A soma da contribuição de cada eixo permite estimar a resposta da função para o comboio completo.

Na Figura 9, apresenta-se um exemplo de cálculo para um comboio alfa pendular (Marcelino, 2005). A geometria considerada no cálculo dos parâmetros geométricos da viga de Winkler, foram os preconizados pela REFER para a Linha do Norte, enquanto para as características elásticas dos materiais envolvidos admitiram-se valores correntes tendo em consideração dos materiais habitualmente usados na construção da ferrovia. Assim considerou-se: módulo de elasticidade do aterro – 300 MPa; largura do aterro no coroamento – 13,52 m; altura do aterro – 1,0 m; largura do balastro – 8 m; altura de balastro 0,5 m; módulo de elasticidade do solo de fundação – 150 MPa; coeficiente de Poisson – 0,3. Nestas condições a velocidade crítica, para amortecimento nulo, dada pela teoria da viga de Winkler é de 222,2 km/h. A solução foi da equação foi assim calculada considerando $\alpha = 0,225$ e considerou-se ainda $\beta = 0,1$ uma vez que os solos exibem sempre algum amortecimento. A resposta calculada permite identificar claramente a passagem dos diversos eixos do comboio alfa

pendular. Quando comparada com o caso estático (não representado) verifica-se que não há praticamente amplificação dos deslocamentos o que é justificado pelo valor reduzido de α considerado no cálculo. Analisando a transformada de Fourier, verifica-se que as frequências correspondentes à resposta calculada são muito baixas, inferiores a 5 Hz, com as componentes mais relevantes abaixo dos 2 Hz. A inexistência de outras frequências explica-se pela simplicidade do modelo apresentado, em que a única causa das vibrações, corresponde ao movimento do campo de tensões, e portanto à passagem dos eixos na secção calculada. De qualquer forma, o modelo permite uma primeira aproximação da resposta esperada na via férrea, e serve como referência para estudos mais complexos.

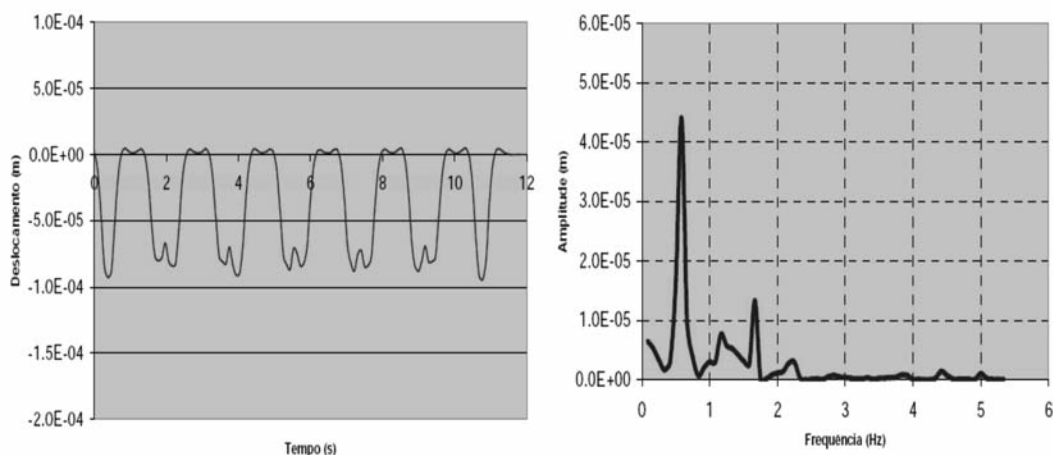


Fig. 9 – Resposta da viga para o comboio alfa pendular a circular a 50 km/h (modelo de Winkler).

4 – MEDIDAS DE MITIGAÇÃO

O objectivo último dos estudos relativos à geração de vibrações devidas à circulação de comboios é o de prever a existência de problemas resultantes da amplificação das vibrações e, caso estes ocorram, dimensionar medidas que permitam anular ou minorar os seus efeitos.

Em seguida são algumas das medidas que têm sido implementadas nos casos em que se detetaram problemas de amplificação dinâmica das vibrações decorrentes da circulação de comboios de alta velocidade.

É necessário distinguir dois grandes tipos de medidas de mitigação. O primeiro destina-se a controlar a geração de vibrações, nos casos em que estas sejam de uma dimensão que possa afectar de alguma forma a circulação ferroviária. O segundo grande grupo é aplicável aos casos em que, muito embora existam vibrações em resultado da circulação, a sua grandeza não é, de todo, prejudicial à circulação mas, em contrapartida, tem efeitos colaterais, por exemplo, provocando a degradação de outras estruturas, causando incomodidade às populações ou afectando equipamentos sensíveis.

Enquanto que em alguns casos a implementação das medidas do primeiro grupo serão suficientes, noutros poderá ser necessário a implementação conjunta dos dois grupos de medidas.

No contexto do dimensionamento das medidas de mitigação das vibrações, as soluções baseadas na viga de Winkler assumem algum interesse na medida em que permitem compreender o funcionamento das medidas de mitigação. Um dos resultados dessa solução, obtida para o caso parti-

cular de fundação elástica, sem amortecimento, é o de identificar a existência de uma velocidade de circulação da carga para a qual a resposta da viga se torna infinita. Essa velocidade pode ser calculada, de acordo com as hipóteses do modelo, como acima se referiu por:

$$V_{Cr} = \sqrt[4]{4k \frac{EI}{m^2}} \quad (16 \text{ bis})$$

Em termos práticos, e apesar das simplificações inerentes ao modelo, a equação anterior permite analisar de que forma os parâmetros envolvidos afectam a velocidade crítica. É imediato reconhecer que o aumento da velocidade crítica pode ser atingido através de:

- aumento da rigidez da fundação expressa através do módulo de reacção k ;
- aumento da rigidez da “viga equivalente” (EI);
- diminuição da massa da viga equivalente (m).

Algumas das soluções de mitigação das vibrações, em especial aquelas que se destinam a controlar a origem da vibração, derivam da possibilidade de alterar o valor da velocidade crítica do conjunto viga+solo, alterando as características que determinam o valor daquelas propriedades. Assim, o aumento de rigidez da fundação (intervindo no valor de k) pode ser conseguido através do reforço do material de fundação, por exemplo, com colunas de brita ou colunas de *jet-grouting*. Note-se, porém, que a velocidade crítica depende dos factores indicados (entre outros não incluídos na formulação), mas a dependência tem uma raiz quarta, o que atenua muito os efeitos de melhoramento. Um aumento de 100% no radicando traduz-se por um aumento de apenas 19% na velocidade crítica. Tomando um factor de segurança da velocidade crítica de 30%, conforme sugerido por alguns autores (Heelis *et al.*, 1999), a razão kEI/m^2 terá de ser aumentada por um factor de aproximadamente 2,85. Outros autores, sugerem, porém, um factor de segurança acrescido. Valores da ordem dos 70% são também referidos na bibliografia.

4.1 – Consolidação forçada da fundação

O problema da construção de estruturas sobre solos moles é um problema clássico no âmbito da Mecânica dos Solos. Também nas infra-estruturas de vias de comunicação ocorrem, frequentemente, situações em que é necessário atravessar zonas em que as características dos solos de fundação põem problemas de assentamentos ou de estabilidade. O tratamento analítico deste problema pode ser feito recorrendo à teoria clássica de consolidação de Terzaghi.

A consolidação dos solos traduz-se por assentamentos que resultam da expulsão diferida da água no solo, devido ao excesso de pressão intersticial gerado pelos acréscimos de carga em resultado das construções. A par do assentamento há um aumento da resistência e uma redução da deformabilidade dos solos da fundação. Em geral e porque os solos moles têm, muitas vezes permeabilidades reduzidas, os tempos de consolidação são elevados, sendo prática corrente recorrer a medidas de aceleração da consolidação. Essas medidas compreendem o aumento de carga sobre as fundações e a diminuição do percurso de drenagem dos solos. A implementação prática desta última medida pode ser feita através da colocação de geodrenos ou de estacas de brita. A contabilização do efeito benéfico resultante da consolidação é traduzida, no caso do modelo da viga de Winkler, pelo aumento do módulo de reacção do terreno (k).

4.2 – *Jet-grouting*, colunas de cal e cimento, estacas

O reforço da fundação da via férrea através da realização de colunas de cimento e cal constitui uma das soluções relatadas na bibliografia. O caso de Ledsgaard, na Suécia, é relatado por Bahrekazemi

e Bodare (2002) e Smekal e Berggren (2002) entre outros, na sequência dos estudos efectuados, onde se reconheceu a necessidade de intervir na infra-estrutura para repor as velocidades de circulação inicialmente preconizadas para a exploração daquela linha.

A tecnologia de construção de colunas de cimento e cal através de injeções na fundação é relativamente bem conhecida e de prática corrente na estabilização de fundações em solos moles, proporcionando a limitação dos assentamentos. A aplicação deste método ao controlo de vibrações é considerada uma extensão natural do processo.

A redução das vibrações é conseguida, à semelhança do que se verifica no caso da consolidação forçada, pelo aumento da rigidez da fundação com o consequente aumento da velocidade crítica. O dimensionamento optimizado da disposição das colunas deve, preferencialmente, ser feito através da modelação numérica tridimensional da fundação com as colunas de *jet-grouting*, por forma a evitar a eventual geração de efeitos colaterais que derivam da alteração das frequências de vibração do conjunto. Alguns autores relatam a possibilidade de aumentarem as vibrações dentro do espectro audível, isto é, com frequências superiores a 20 Hz (Hildebrand, 2004).

O dimensionamento do sistema de colunas é feito tendo em consideração diversos factores, nomeadamente geométricos (diâmetro das colunas, profundidade, disposição em planta) e de composição (relação cal/cimento).

Outra solução, já implementada em diversos atravessamentos em solos moles é o de uma laje apoiada em estacas. Trata-se, de um sistema formalmente semelhante aos acima descritos mas em que a contribuição do solo de fundação se reduz quase exclusivamente à interacção com as estacas. Este tipo de sistema já foi aplicado em diversos locais, como por exemplo na linha férrea HSL South na Holanda, na linha Buxelas-Liège e na ligação entre o túnel da Mancha e a cidade de Londres (Coelho *et al.*, 2006).

4.3 – Reforço da plataforma

Para além da intervenção ao nível da fundação pode, em certos casos, ser também contemplado o reforço da plataforma ferroviária no sentido de aumentar a sua rigidez e assim, aumentar a velocidade crítica. O reforço da plataforma pode incluir diversos tipos de medidas nomeadamente a utilização de geogrelhas que, entre outros efeitos, conferem um aumento de rigidez da plataforma ou, a estabilização de solos com a adição de ligantes hidráulicos. Em qualquer dos casos, a velocidade crítica aumenta em virtude de aumentar a rigidez do elemento “viga” do modelo de Winkler, contribuindo, por isso para a redução da importância das vibrações geradas pela passagem do comboio.

4.4 – Barreiras de vibração

Uma parte significativa das vibrações que causam maior incomodidade e efeitos mais nocivos propaga-se junto à superfície do terreno. As ondas Rayleigh - Ondas R - são aquelas que apresentam a velocidade de propagação mais reduzida, portanto com maior probabilidade de ser igualada pela velocidade de circulação dos comboios, e são geradas precisamente pela interacção entre as ondas volumétricas junto à superfície onde se dá a transição entre o semi-espaço infinito - terreno e o ar.

O controlo da propagação dessas vibrações pode, portanto, ser feito impedindo a sua transmissão junto à superfície, criando uma trincheira vazia ou preenchida, através da qual essas ondas não se propaguem.

Hung *et al.*, (2004) recorrendo à modelação de trincheiras com e sem preenchimento, mostram que, em geral, considerando os efeitos estáticos e dinâmicos das cargas em movimento, as últimas são mais eficientes no controlo da transmissão das vibrações.

O dimensionamento de uma trincheira destina-se a determinar a sua geometria (profundidade e largura), as características do material de preenchimento e o seu posicionamento relativamente à fonte de excitação (Ahmad e Al-Hussaini, 1991).

Segundo Hung e Yang (2001), a profundidade da trincheira deve ser da ordem de grandeza do comprimento de onda das ondas de superfície para ser eficiente. Para uma gama de velocidades entre 150 e 250 km/h, ondas com frequências da ordem dos 5 Hz têm comprimentos de onda entre 8 e 14 m, enquanto que, para frequências elevadas, por exemplo de 50 Hz, os comprimentos de onda oscilam entre 0,8 e 1,4 m. Assim, as trincheiras de dimensões correntes são eficientes apenas no controlo das frequências médias a altas.

4.5 – Blocos de controlo de vibrações

O princípio de funcionamento dos blocos de controlo de vibrações consiste no facto de as camadas de solo sobre um substrato rochoso terem o seu comportamento dinâmico condicionado pela existência dessa barreira natural. Nestes casos, não é possível existirem modos de vibração com frequências inferiores a $V_p/4h$ ou a $V_s/4h$, sendo h a altura da fundação acima do substrato rochoso, para as vibrações de compressão verticais ou para as vibrações de ondas de corte (com velocidades de propagação de V_p e V_s), respectivamente (Hung e Yang, 2001).

Tirando partido desse facto, para impedir ou limitar a propagação de vibrações no solo de fundação de um aterro ferroviário pode-se construir um bloco de controlo de vibração (Takemiya *et al.*, 1995). Na Figura 10 ilustra-se esquematicamente o funcionamento do sistema. O princípio de funcionamento consiste no aumento da frequência de corte reduzindo o valor de h , pela introdução de uma barreira à propagação das vibrações. Essa barreira pode ser construída antes da colocação do aterro, sendo materializada através de uma laje ou, durante o funcionamento da linha de caminho de ferro, recorrendo às técnicas de *jet-grouting*. Em princípio, a construção de uma laje implica a realização de escavações de monta, com os consequentes custos e dificuldades de execução. Recorrendo à técnica de *jet-grouting* os custos são mais limitados podendo esta técnica ser aplicado antes ou após a entrada em funcionamento da linha.

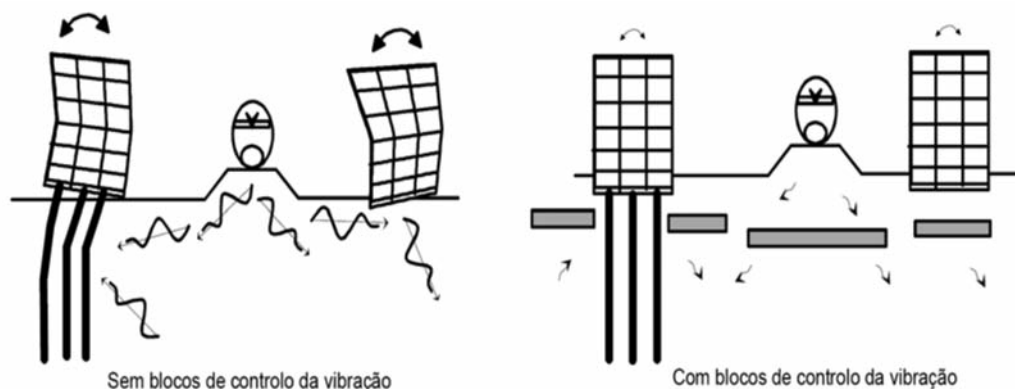


Fig. 10 – Funcionamento dos blocos de controlo de vibração.
(adaptado de Takemiya, 2005 – <http://www.aisawa.co.jp>).

A eficiência do método aumenta com a rigidez dos blocos, o que pode ser conseguido à custa do aumento da sua espessura ou da rigidez do material que os compõe. Em qualquer caso, para as dimensões normais, o bloco não impede totalmente a vibração.

4.6 – Vigas e lajes flutuantes

A utilização de lajes flutuantes constitui um processo de controlo das vibrações muito usado em comboios urbanos do tipo metropolitano ou em algumas linhas de alta velocidade, como por exemplo no Japão (Esveld, 2001).

Para além das vantagens relacionadas com o controlo de vibração, as vias de caminho de ferro assentes sobre lajes apresentam menores custos de manutenção, apesar de o custo inicial ser bastante superior.

As vantagens das vias assentes sobre uma laje são diversas: baixo custo de manutenção (valores típicos entre 20 e 30% do custo de manutenção de uma via balastrada); baixo peso (vantajoso em obras de arte); altura reduzida (mais importante em túneis e outras situações em que o espaço disponível é reduzido); redução dos níveis de vibração; execução mais expedita (em especial recorrendo à pré-fabricação), entre outras. No que respeita ao controlo de vibrações, parte das vantagens de uma via assente numa laje podem ser novamente interpretadas recorrendo à expressão da velocidade crítica da viga de Winkler. De acordo com esta expressão, o aumento da velocidade crítica pode ser conseguido aumentando o valor da rigidez à flexão da viga (EI) a par da redução da massa da mesma. As soluções de via assente em laje cumprem ambos os desideratos. Com efeito, apesar de, em geral, o momento de inércia ser menor, comparativamente com aquele que se obtém com as espessuras habituais de via balastrada, o módulo de elasticidade do betão é muito superior ao do balastro e, por outro lado, a massa por unidade de comprimento poderá também ser inferior.

Outra parcela do controlo de vibrações resultante da aplicação de lajes flutuantes é conseguida nos casos em que a mesma apoie numa estrutura em betão armado ou equivalente. Nesses casos, o apoio entre a laje e a estrutura pode ser efectuado com recurso sistemas em materiais elastoméricos que à semelhança das palmilhas de assentamento dos carris limitam a propagação de vibrações de frequência mais elevada (Figura 11).

Os sistemas de viga flutuante com ou sem balastro apoiados em materiais elastoméricos são designados habitualmente por *mass-spring systems*. Seu princípio de funcionamento baseia-se na alteração da frequência de vibração do conjunto veículo-via por alteração das características dinâmicas do conjunto: massa, elasticidade e amortecimento. Trata-se de um sistema, em geral, eficiente e dispendioso e é usado com alguma frequência em túneis e vias férreas urbanas, em especial na Áustria (Unterberger, 2004).

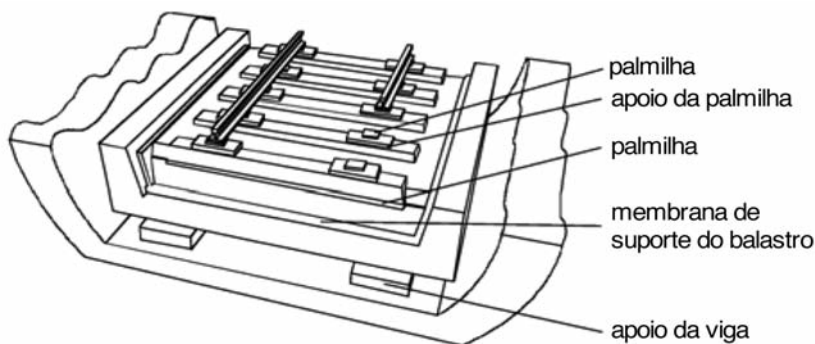


Fig. 11 – Sistema massa-mola para controlo de vibrações.

Uma extensão do sistema de laje flutuante é o sistema de “viga flutuante” ou *Deck-Track*. O sistema consiste numa viga em caixão, em tudo semelhante a uma estrutura de ponte em caixão. Esta estrutura apoia directamente, de forma contínua, no solo de deficientes características mecânicas, podendo ser enterrado neste (Figura 12). Com este sistema, há compensação do peso da estrutura em relação ao solo escavado, pelo que não há lugar a assentamentos diferidos. Por outro lado, do ponto de vista dinâmico, a estrutura em caixão apresenta, como foi dito, peso reduzido mas também elevada rigidez, contribuindo, assim, por esses dois aspectos, de forma decisiva, para o aumento da velocidade crítica e, conseqüentemente, para a redução dos fenómenos dinâmicos devidos à circulação (Madshus, 2001).

Até ao momento, apenas foi construída uma secção experimental, com cerca de 200 m, na linha de ligação de Roterdão ao porto da mesma cidade. Os resultados da monitorização instalada nessa secção experimental tem mostrado que o comportamento é muito bom e está dentro do esperado (Stuit e Bos, 2005).

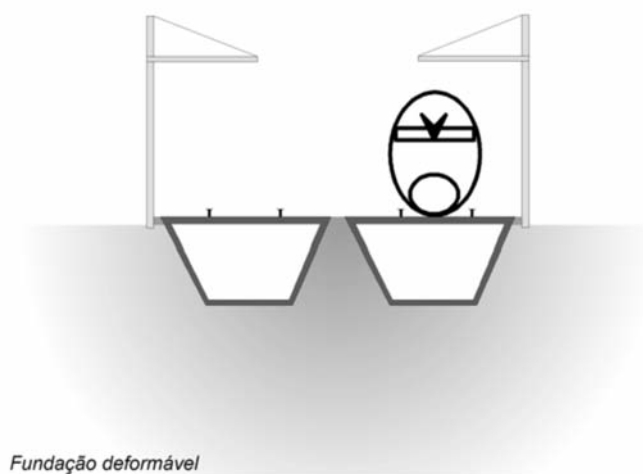


Fig. 12 – Via em caixão vazado continuamente apoiado na fundação (*Deck-Track*).

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Portugal irá assistir, em breve, à construção de algumas centenas de quilómetros de novas vias férreas destinadas essencialmente ao tráfego de alta velocidade. Nestas vias as exigências relativas ao comportamento da infra-estrutura são, naturalmente maiores que nas vias tradicionais. Um dos muitos aspectos que é necessário considerar prende-se com as vibrações provocadas pela circulação dos comboios. Estas podem ainda ser agravadas por fenómenos dinâmicos que se colocam em especial em zonas onde as condições de fundação da plataforma sejam mais precárias. A natureza marcadamente tridimensional do fenómeno implica que o seu estudo teórico seja feito com o recurso a modelos matemáticos sofisticados. Porém alguma compreensão fenomenológica pode ser conseguida através de modelos mais simples como aqueles que se baseiam na solução da viga de Winkler.

O controlo da propagação das vibrações pode ser feito recorrendo a um conjunto de soluções que actuam quer ao nível da superestrutura quer ao nível da infra-estrutura. Algumas dessas soluções são apresentadas discutindo-se sucintamente o seu princípio de funcionamento e a sua eficiência.

6 – AGRADECIMENTOS

O trabalho foi realizado no âmbito do projecto POCI/ECM/61114/2004 “Interacção solo-via férrea para comboios de alta velocidade”, desejando o autor expressar um agradecimento à FCT pelo suporte financeiro concedido.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, S.; Al-Hussaini, T. M. (1991) - *Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches*. Journal of Geotechnical Engineering, 117(1), pp. 67-88.
- Anderson, W.F.; Key, A. J. (2000) - *Model testing of two-layer railway track ballast*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, April 2000.
- Bahrekazemi, M.; Bodare, A. (2002) - *Train-Induced Ground Vibrations Reduced by Lime-Cement Column Soil Stabilization*. Structural Dynamics, EURODYN2002, Grundmann & Schueller (eds) pp. 473-478.
- Bettess, P. (1992) - *Infinite Elements*. Penshaw Press.
- Biot, M. (1937) - *Bending of an infinite beam on an elastic foundation*. Journal of Applied Mechanics, ASCE, pp. A1-A7.
- Coelho B.; Calçada, R.; Delgado, R. (2006) - *Comportamento dinâmico de Lajes sobre estacas para suporte de vias férreas de alta velocidade*. 4^{as} JPEE 2006. Lisboa, LNEC.
- Dawn, T. M.; Stanworth, C. G. (1979) - *Ground vibration from passing trains*. Journal of Sound and Vibration, 66, pp. 335-362.
- Degrande, G.; Schillmans, L. (2001) - *Free field vibrations during the passage of a thalys high-speed train at variable speed*. Journal of Sound and Vibration, 247(1), pp. 131-144.
- Esveld, C. (2001) - *Modern Railway Track*. MRT-Productions. Delft University of Technology.
- Filippov (1961) - *Steady-state vibrations of a infinite beam on elastic half-space subjected to a moving load*. Izvestija AN SSSR OTN Mehanika i Mashinostroenie, 7, pp. 97-105.
- Frýba L.; Yoshikawa, N. (1998) - *Bounds analysis of a beam based on the convex model of uncertain foundation*. Journal of Sound and Vibration, 212(3), pp. 547-557.
- Gardien, W.; Stuit, H. G. (2003) - *Modelling of soil vibrations from railway tunnels*. Journal of Sound and Vibration, 267, pp. 605-619.
- Gutowski, T. G.; Dym, C. L. (1976) - *Propagation of ground vibration: A review*. Journal of Sound and Vibration, 49(2), pp. 179-193.
- Hall, L. (2000) - *Simulations and analyses of train-induced ground vibrations. A comparative study of two and three-dimensional calculations with actual measurements*. Royal Institute of Technology. Doctoral Thesis 1034. Stockholm 2000.
- Hall, L. (2003) - *Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23, n° 5, pp. 403-413.
- Heelis, M. E.; Collop, A. C.; Dawson, A.R.; Chapman, D. N.; Krylov, V. (1999) - *Predicting and measuring vertical track displacements on soft subgrades*. World Congress on Railway Research October 19-23, 1999 Tokyo, Japan.

- Hildebrand, R. (2004) - *Effect of soil stabilization on audible band railway ground vibration*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24, nº5, pp. 411-424.
- Hung, H. H.; Yang, Y. B. (2001) - *A Review of Researches on Ground-Borne Vibrations with Emphasis on those Induced by Trains*. Proc. Natl. Sci. Coun. ROC(A) Vol. 25, Nº. 1, pp. 1-16.
- Hung, H. H.; Yang, Y. B.; Chang, D. W. (2004) - *Wave barriers for reduction of train-Induced vibrations in soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130:12, pp. 1283-1291.
- Jones C. J. C.; Block, J. R. (1996) - *Prediction of ground vibration from freight trains*. Journal of Sound and Vibration, 193(1), pp. 205-213.
- Kaynia, A. M.; Madshus C.; Zackrisson P. (2000) - *Ground vibration from high-speed trains: prediction and countermeasure*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(6), pp. 531-537.
- Kenney, J. T. (1954) - *Steady-state vibrations of a beam on elastic elastic foundation for moving load*. Journal of Applied Mechanics, Vol. 76, pp. 359-364.
- Kogut, J.; Degrande, G.; Hegeman, W.; Karl, L. (2003) - *In situ vibration measurements on the high speed track L2 – Brussels-Köln*. Structures for high-speed railway trasnpostation. IABSE Symposium 2004.
- Krylov, V. V. (2002) - *Effects of the embankment topography and track curvature on ground vibration boom from high-speed trains*. Structural Dynamics, EUROODYN2002, Grundmann & Schueller (eds) pp. 473-478.
- Labra, J. J. (1975) - *An axially stressed railroad track on an elastic continuum subjected to a moving load*. Acta Mechanica, 22, pp. 113-129.
- Madshus, C. (2001) - *Modelling, monitoring and controlling the behaviour of embankments under high speed loads*. Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures, pp. 225-238.
- Madshus, C.; Kaynia, A. M. (2000) - *High-speed railway lines on soft ground: dynamic behaviour at critical train speed*. Journal of Sound and Vibration, 231(3), pp. 689-701.
- Marcelino, J. (2005) - *Propagação e mitigação de vibrações de baixa frequência geradas por comboios de alta velocidade*. I&D, Programa de Investigação. LNEC, Lisboa.
- Marcelino, J.; Monteiro, C. V. (2006) - *Medição das vibrações em aterros geradas por comboios de alta velocidade*. 4^{as} JPEE 2006. Lisboa, LNEC.
- Metrikine, A. V.; Vostrukhov, A. V.; Vrouwenvelder, A. C. W .M. (2001) - *Drag experience by a high-speed train due to excitation of ground vibrations*. International Journal of Solids and Structures, 38, pp. 8851-8868.
- MOPHT/MF (2003) - *XIX Cimeira Luso-Espanhola. Memorando de entendimento*. Figueira da Foz – 7/8 de Novembro de 2003.
- MOPHT/MF (2005) - *XXI Cimeira Luso-Espanhola. Memorando de entendimento*. Évora – 18/19 de Novembro de 2005.
- Paolucci, R.; Maffei, A.; Scandella, L.; Stupazzini, M. ;Vanini, M. (2003) - *Numerical prediction of low-frequency ground vibrations induced by high-speed trains at Ledsgaard, Sweden*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23, pp. 425-433.
- Perera, R.; Alarcón, E. (1997) - *FE-BE Coupling Methods for Elastoplasticity*. Communications In Numerical Methods In Engineering, Vol. 13, pp. 785-792.

- Schnack E.; Turke; K. (1997) - *Domain decomposition with BEM and FEM*. International Journal For Numerical Methods In Engineering, Vol. 40, pp. 2593-2610.
- Sheng, X.; Jones C. J. C; Petyt; M. (1999) - *Ground vibration generated by a load moving along a railway track*. Journal of Sound and Vibration, 228(1), pp. 129-156.
- Sheng, X.; Jones C. J. C; Petyt, M. (1999a) - *Ground vibration generated by a harmonic load acting on a railway track*. Journal of Sound and Vibration, 225(1), pp. 3-28.
- Sheng, X.; Jones, C. J. C.; Thompson, D. J. (2003) - *A comparison of a theoretical model for quasi-statically and dynamically induced environmental vibration from trains with measurements*. Journal of Sound and Vibration, 267, pp. 621-635.
- Shin, E. C.; Kim; D. H., Das; B. M. (2002) - *Geogrid-reinforced railroad bed settlement due to cyclic load*. Geotechnical and Geological Engineering, 20:3, pp. 261-271.
- Sitharam, T. G.; Vijay Kumar, I. V. (1998) - *Non-linear analysis of geomechanical problems using coupled finite and infinite elements*. Geotechnical and Geological Engineering, 16, pp. 129-149.
- Smekal, A.; Berggren, E. (2002) - *Mitigation of track vibration at Ledsgard Sweden, Field measurements before and after soil improvement*. Structural Dynamics, EUROLYN2002, Grundmann & Schueller (eds), pp. 473-486.
- Stuit, H. G.; Bos, J. A. (2005) - *Deck Track: a new foundation for railways: Deck Track offers a cost-effective alternative for heavy-loaded freight lines as well as high-speed lines constructed in soft-soil areas*. International Railway Journal. May 2005.
- Takemiya, A.; Shim, K; Goda, K. (1995) - *Embankment train track on soil stratum and wave impeding block (WIB) measured for vibrations reduction*. Transactions on Built Environment 14.
- Takemiya, A. (2005) - *Development of Vibration Reduction Measure Wave Impeding Block*. Páginas consultadas em Janeiro 2005: <<http://www.aisawa.co.jp>>; <<http://www.aisawa.co.jp/giken/ronbun/doboku/istokyo/wibkoku.htm>>.
- Unterberger, W. (2004) - *Vibration Mitigation at High Speed Railroads*. Course on Geotechnical Risks in Rock Tunnelling. Portugal, Aveiro, April 2004.
- Yang, Y. B.; Hung, H. H. (2001) - *A 2.5D finite/infinite element approach for modeling visco-elastic bodies subjected to moving loads*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 51, pp. 1317-1336.
- Yang, Y. B.; Hung, H. H.; Chang, D.W. (2003) - *Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23, pp. 263-278.
- Zhai, W. H.; Wang, K. Y., Lin, J. H. (2004) - *Modelling and experiment of railway ballast vibrations*. Journal of Sound and Vibration, 270, pp. 673-683.