

Análise da estabilidade da via balastrada num viaduto com tabuleiro misto aço-betão para tráfego de comboios de alta velocidade

Stability analysis of the ballasted track in a composite steel-concrete viaduct for high-speed trains traffic

Artur Silva
Gonçalo Ferreira
Rui Caçada

Resumo

Em pontes ferroviárias a circulação de comboios de alta velocidade traduz-se num carregamento periódico produzido pela passagem dos sucessivos eixos do comboio regularmente espaçados, que pode originar fenómenos de ressonância da estrutura. Estes efeitos ressonantes podem originar acelerações excessivas do tabuleiro e, como consequência, conduzir à instabilização da camada de balastro.

O presente trabalho foca-se na análise das acelerações da laje superior do tabuleiro misto aço-betão do viaduto norte de acesso à nova ponte ferroviária sobre o rio Sado. Para a análise dinâmica da estrutura desenvolveu-se um modelo de elementos finitos que permitiu obter a resposta dinâmica em termos de acelerações no tabuleiro na zona que serve de suporte direto à via balastrada. Especial atenção é dada à avaliação da influência do tipo e velocidade do comboio, da gama de frequências utilizada na análise dinâmica, do amortecimento, e da distribuição espacial dos valores de pico de aceleração em situações ressonantes.

Abstract

In railway bridges, the passage of high-speed trains originates a periodic load produced by the passage of the sequent regularly spaced train axles, which may cause resonance of the structure. These resonant effects can cause excessive accelerations of the deck and, consequently, lead to the instability of the ballast layer.

The present work focuses on the analysis of the accelerations in the upper slab of the composite steel-concrete deck of the north access viaduct to the new bridge over the Sado river. For the dynamic analysis of the structure, a finite element model was developed that allows to obtain the dynamic response in terms of accelerations in the deck, in the zone that serves as direct support to the ballasted track. Special attention is given to the assessment of the influence of type and speed of train, frequency range used in dynamic analysis, damping, and spatial distribution of the peak acceleration values in resonant situations.

Palavras-chave: Estabilidade da via / Viaduto ferroviário / Tabuleiro misto aço-betão / Análise experimental e numérica / Comboios de alta velocidade / Efeitos ressonantes

Keywords: Track stability / Railway viaduct / Composite steel-concrete deck / Numerical and experimental analysis / High-speed trains / Resonant effects

Artur Silva

CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Porto, Portugal
artur.silva@fe.up.pt

Gonçalo Ferreira

CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Porto, Portugal
gcferreira@fe.up.pt

Rui Calçada

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

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

SILVA, A. [et al.] – Análise da estabilidade da via balastrada num viaduto com tabuleiro misto aço-betão para tráfego de comboios de alta velocidade. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 9. ISSN 2183-8488. (março 2019) 93-100.

1 Introdução

Durante as últimas décadas, o sistema ferroviário mostrou uma grande influência no desenvolvimento social e económico na nossa sociedade. Na Europa, o transporte ferroviário assume, atualmente, um papel importante para atingir a estratégia da Europa 2020. Esta estratégia visa um desenvolvimento de uma economia inteligente e mais sustentável e competitiva [1]. Como tal, é necessário introduzir novas linhas de alta velocidade, ou modernizar as existentes, reduzindo assim os tempos de viagem, melhorando o conforto dos passageiros e reduzindo o congestionamento da rede ferroviária. Para reforçar a posição competitiva do setor ferroviário europeu, é necessária uma maior investigação e um desenvolvimento mais coordenado a longo prazo. Este trabalho pretende contribuir para uma evolução no conhecimento das implicações do tipo de tráfego ferroviário a nível estrutural, mais detalhadamente na influência das velocidades de circulação de comboios de alta velocidade nas acelerações verticais em tabuleiros de pontes mistas, que podem levar à instabilização do balastro. Este estudo tem por base a análise da distribuição espacial das acelerações do tabuleiro do viaduto Norte da nova ponte ferroviária sobre o rio Sado, localizada em Alcácer do Sal. Recorrendo a modelos numéricos do viaduto, irá ser estudada a influência de vários parâmetros da estrutura na resposta dinâmica em termos de acelerações verticais do tabuleiro. Com os resultados deste estudo, poderão ser discutidas algumas questões relacionadas com a regulamentação em vigor, bem como a influência e as implicações da passagem de comboios de alta velocidade no viaduto em questão.

2 aspetos regulamentares

2.1 Comboios de alta velocidade

As análises dinâmicas devem ser realizadas usando os valores característicos das cargas dos comboios reais especificadas para o projeto. A escolha desses comboios deve ser efetuada tendo em conta a composição dos mesmos e desde que se preveja que venham circular na estrutura a uma velocidade superior a 200 km/h. Os comboios de alta velocidade que irão ser estudados neste trabalho são o Alfa Pendular, o Talgo AV2, o Thalys 2, o Eurostar 373, o X 2000, o TGV Atlantique, o Virgin, o ICE 2 e o ETR-Y-500. As características de cada veículo encontram-se descritas no relatório ERRI D214/RP9 [2].

2.2 Aceleração vertical do tabuleiro

No que toca à aceleração vertical do tabuleiro, o nível das acelerações com a passagem de tráfego ferroviário a velocidades superiores a 200 km/h obriga a que as acelerações verticais se mantenham abaixo de certos limites, como se encontram especificados na EN1990-Anexo A2 [3] e inicialmente propostos pela comissão de especialistas D214 da ERRI. Estes limites estão ligados à ocorrência de fenómenos de instabilidade na camada de balastro, associados à perda da resistência lateral da via em vias balastradas e à perda de contacto entre a roda e o carril pelo acréscimo de forças de contacto em vias não balastradas. Para o caso de vias balastradas, o limite máximo do valor de cálculo da aceleração vertical é de 3,5 m/s² [3].

Para o cálculo das acelerações e a determinação dos seus máximos, deve ser considerada a contribuição de modos de vibração com frequências até um máximo de 30 Hz, 1,5 vezes a frequência do modo de vibração fundamental do elemento que está a ser considerado ou a frequência do terceiro modo de vibração do elemento. Para avaliar o comportamento dinâmico da via balastrada, para vários níveis de aceleração, efetuou-se um conjunto de ensaios que consistiu na reprodução em laboratório de um troço de via balastrada, submetendo-o a diversos níveis de aceleração considerando frequências até 60 Hz [4]. Do resultado dos ensaios constata-se que as maiores amplificações ocorrem para acelerações superiores a 0,7 g (aproximadamente, 7 m/s²), verificando-se que os valores da função de transferência aumentam até a uma frequência de 60 Hz. O critério da EN1990-Anexo A2, limita a aceleração vertical do tabuleiro a 3,5 m/s², no caso das pontes com via balastrada. Este valor máximo de aceleração é resultante da aplicação de um fator de segurança de 2,0 aos valores limite de aceleração obtidos experimentalmente. As recomendações que resultam das investigações realizadas apontam para uma modificação da gama de frequências a considerar na análise dinâmica, sendo a frequência limite o mínimo de 60 Hz ou a frequência do terceiro modo de vibração que pode ser excitado pelo tráfego. A análise de registos experimentais relativos à passagem de comboios em pontes da rede ferroviária alemã permitiu concluir que o limite regulamentar da aceleração vertical é por diversas vezes ultrapassado, para um número reduzido de picos associados à passagem da locomotiva do comboio ou até mesmo de veículos intermédios, não se registando instabilização da camada de balastro [4]. O critério regulamentar da EN1990-Anexo A2 tem apenas em conta o valor máximo registado da aceleração vertical, não tendo em conta o número de ciclos nos quais os valores regulamentares são ultrapassados. Face a isto, a Deutsche Bahn elaborou uma proposta alternativa ao critério da EN1990-Anexo A2, que atende não só à limitação da aceleração vertical do tabuleiro mas também à influência que elevados níveis de aceleração podem ter na diminuição da resistência lateral da via [4]. Segundo este critério, são permitidos 10 ciclos sucessivos de vibração com níveis de aceleração superiores aos regulamentares, caso o critério da limitação da aceleração vertical do tabuleiro não seja inteiramente cumprido, não podendo ser excedido o valor de 0,55 g (cerca de 5,5 m/s²) em pontes com via balastrada. Este valor limite implica um fator de segurança de 1,3 relativamente aos valores limite de aceleração obtidos experimentalmente.

3 Metodologias de análise dinâmica

3.1 Método da sobreposição modal

O método da sobreposição modal permite resolver a equação de equilíbrio dinâmico,

$$M \ddot{u}(t) + C \dot{u}(t) + K u(t) = F(t) \quad (1)$$

através de uma mudança de coordenadas, denominada de transformação modal, obtendo-se as equações de equilíbrio dinâmico desligadas referentes a cada um dos modos de vibração,

$$M_n \ddot{y}_n(t) + C_n \dot{y}_n(t) + K_n y_n(t) = F_n(t) \quad (2)$$

onde $F_n(t)$ representa as forças modais que podem ser calculadas através da seguinte equação:

$$F_n(t) = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ \vdots \\ F_j(t) \\ \vdots \\ F_j(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \cdots & \phi_{1,k} & \cdots & \phi_{1,K} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{j,1} & \cdots & \phi_{j,k} & \cdots & \phi_{j,K} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{j,1} & \cdots & \phi_{j,k} & \cdots & \phi_{j,K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1(t) \\ \vdots \\ F_k(t) \\ \vdots \\ F_K(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

em que $\phi_{j,k}$ corresponde ao deslocamento modal do grau de liberdade k , para o modo de vibração j e $F_k(t)$ corresponde ao histórico de carregamento para o grau de liberdade k . Tanto $\phi_{j,k}$ como $F_k(t)$ são matrizes com valores já conhecidos. Visto que no modelo de uma estrutura ferroviária existe uma grande quantidade de graus de liberdade, este processo pode simplificar-se considerando que as cargas apenas estão aplicadas na direção vertical nos nós correspondentes ao carril, sendo que os outros graus de liberdade têm carga nula. Nesse caso, só o deslocamento vertical modal dos nós que definem o carril para cada modo de vibração j é solicitado. Esta simplificação torna o processo mais veloz, não sendo necessária uma capacidade de processamento de dados tão elevada como seria necessário para correr o processo de acordo com a Equação (3). As matrizes de forças modais são aplicadas como carregamento quando se realiza uma análise dinâmica com cargas móveis. O método das cargas móveis considera os comboios como um conjunto de cargas móveis de valor igual às cargas estáticas por eixo e constantes ao longo do tempo. A resposta dinâmica pode ser calculada, para cada incremento de tempo t , resolvendo a equação de equilíbrio dinâmico através de, por exemplo, o método da sobreposição modal. Para realizar uma análise com cargas móveis, neste caso no programa ANSYS, é necessário construir uma matriz que tem os valores nodais das forças dependentes do carregamento do comboio e a velocidade de circulação deste. O procedimento para a análise através do método das cargas móveis foi proposto por Albuquerque [5]. Assim, com a informação detalhada da solicitação de cada nó, em cada instante de tempo e para uma dada velocidade de circulação, é possível aplicar estes dados para determinar a resposta estática da estrutura num dado instante de tempo [6].

3.2 Metodologia ANSYS-MATLAB

Para a realização da análise dinâmica recorre-se ao programa MATLAB, tendo como interface para a geração do modelo e para a realização da análise modal o programa ANSYS [7]. Após a realização da análise modal, executam-se comandos que permitem extrair os deslocamentos verticais modais dos nós dos carris e dos restantes nós da malha que se configurou anteriormente. Deste modo, o ANSYS volta a correr em segundo plano para extrair os parâmetros referidos, bem como os valores modais da frequência, da massa e do amortecimento. Este procedimento torna-se demorado devido à quantidade de cálculos que são exigidos. Após a obtenção dos deslocamentos modais, interessa importar a informação relativa ao carregamento real de cada comboio, ficando assim com o conhecimento do nome do mesmo, das cargas por eixo e da distância entre eixos. Após a importação, realiza-se um ciclo onde irá variar a velocidade de circulação de cada comboio e que permite construir

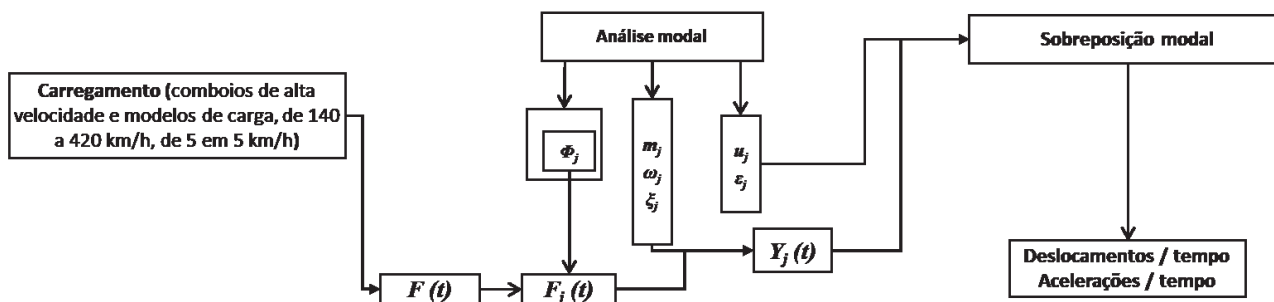


Figura 1 Esquema do procedimento adotado para a obtenção dos deslocamentos e acelerações (adaptado de [6])

as matrizes de carga e determinar os valores modais das forças. Por fim, as grandezas modais que foram determinadas são multiplicadas pelas coordenadas modais, obtendo-se assim a evolução temporal dos deslocamentos para cada velocidade [6]. Este processo pode repetir-se para a gama de velocidades, amortecimento e comboio desejados. As acelerações obtêm-se através da segunda derivada dos deslocamentos que foram obtidos. O diagrama apresentado na Figura 1 representa um esquema do procedimento adotado.

4 Modelo e análise dinâmica do viaduto

4.1 Localização e descrição do viaduto Norte

A nova ponte ferroviária sobre o rio Sado e os seus respetivos viadutos localizam-se no distrito de Setúbal, perto de Alcácer do Sal, a cerca de 100 km de Lisboa. Esta estrutura integra a Linha Ferroviária do Sul, fazendo parte de um projeto ferroviário que irá melhorar as conexões ao Sul do país.

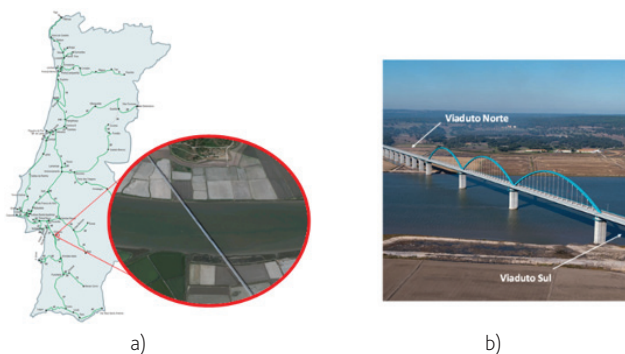


Figura 2 a) Localização da ponte na rede ferroviária nacional (adaptado de [8]); b) Vista geral da ponte e dos viadutos de acesso (adaptado de [9])

O viaduto Norte consiste numa solução estrutural mista em aço e betão composta por duas longarinas com secção em I que suportam uma laje em betão armado. O estudo realizado neste trabalho foca-se num vão simplesmente apoiado do viaduto de acesso Norte que tem um comprimento de 45,0 m. Trata-se do primeiro vão do viaduto norte que faz fronteira com a ponte.

4.2 Modelo em elementos finitos

A modelação numérica foi realizada através do programa ANSYS [7] através de técnicas usuais de discretização, por meio do método de elementos finitos onde se inclui no modelo o sistema da via-férrea. O modelo usado foi desenvolvido por Alencar [10], recorrendo à linguagem APDL do software ANSYS. Esta linguagem permite fornecer instruções em texto ao programa, nas várias fases de análise de elementos finitos da estrutura (pré-processamento ou modelação, cálculo e pós-processamento), sem recorrer à interface gráfica, tornando assim possível que um programa, como o MATLAB, corra e comunique com o ANSYS em vários tipos de análise [6]. O modelo numérico do viaduto inclui só um vão de 45,0 m, pois, como foi dito anteriormente, não há continuidade entre os vãos adjacentes, nem com a estrutura ou com a via-férrea. Para a modelação dos vários elementos do viaduto, recorreu-se a elementos finitos de casca (SHELL181), de barra (BEAM44), sólidos (SOLID185), infinitamente rígidos (MPC184) e de massa pontual (MASS21).

4.3 Análise dinâmica do viaduto

Após a modelação numérica do viaduto, realizou-se uma análise modal para identificar os modos de vibração da estrutura, sendo que as deformadas dos três principais modos de vibração globais do viaduto em análise são apresentadas na Figura 3.

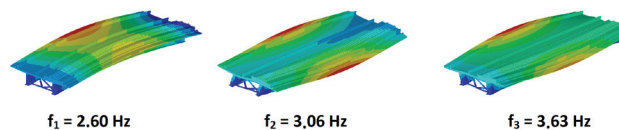


Figura 3 Deformada dos principais modos de vibração obtidos por modelação numérica (adaptado de [10])

4.3.1 Parâmetros a considerar

Para cálculo das acelerações na via, tiveram-se em conta os parâmetros indicados no Quadro 1. De referir que a gama de velocidades indicada tem em conta o regulamentado na EN1991-2 [11]. O amortecimento adotado tem em conta o mínimo regulamentar da EN1991-2.

Quadro 1 Parâmetros considerados na análise dinâmica

Parâmetros da análise dinâmica	
Comboios	Alfa Pendular, Talgo Av2, Thalys 2, Eurostar 373, X 2000, TGV Atlantique, Virgin, ICE 2, ETR-Y-500
Gama de velocidades	140 a 420 km/h, de 5 em 5 km/h
Modos de vibração	Aproximadamente 60 Hz (340 modos)
Amortecimento	0,5%
Incremento de tempo	0,001 s
Tempo em vibração livre	5 s

4.3.2 Resultados da análise dinâmica

Os resultados que irão ser apresentados dizem respeito ao nó central que se situa na laje do tabuleiro, na zona da via balastrada (Figura 4), e indicam os valores absolutos das acelerações. Por sua vez, os mapas de acelerações dizem respeito à distribuição espacial das acelerações na via correspondentes à zona da laje do tabuleiro que se encontra por baixo da via balastrada, como se encontra ilustrado na Figura 4.

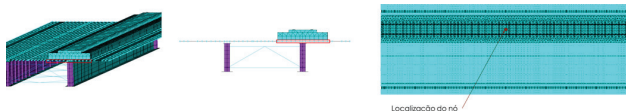


Figura 4 Localização da zona da via e do nó referente às análises efetuadas

A comparação dos resultados de cada comboio irá ser feita com base nos limites impostos na EN1990 Anexo A2 [3]. Estes limites dizem respeito à tipologia de via balastrada, sendo a aceleração vertical máxima de 3,5 m/s² (representada nos gráficos como “Limite ECO”). Excepcionalmente, este valor regulamentar pode ser excedido em 10 ciclos sucessivos de vibração, não podendo assim neste caso, a aceleração vertical máxima ultrapassar os 5,5 m/s² (representada nos gráficos como “Limite Excepcional ECO”). A Figura 5 representa as acelerações máximas no nó em análise em função da velocidade de circulação de todos os comboios analisados. Da figura, verifica-se que os comboios que agravam mais a resposta dinâmica da estrutura em termos de acelerações máximas são o X 2000, o Virgin, o ICE 2 e o ETR-Y-500.

No Quadro 2 encontram-se representados os comboios que ultrapassam o limite regulamentar no nó em análise, chamados comboios críticos, indicando também a velocidade de circulação que leva à máxima aceleração no nó referido. Verifica-se que o comboio que atinge maiores acelerações é o Virgin, sendo que a sua velocidade crítica corresponde exatamente à sua velocidade típica de circulação. No quadro está representado o Alfa Pendular, pois apesar de não ultrapassar o limite regulamentar de 3,5 m/s², este é o

comboio que circula no viaduto em questão, interessando, portanto, saber a resposta dinâmica para este veículo.

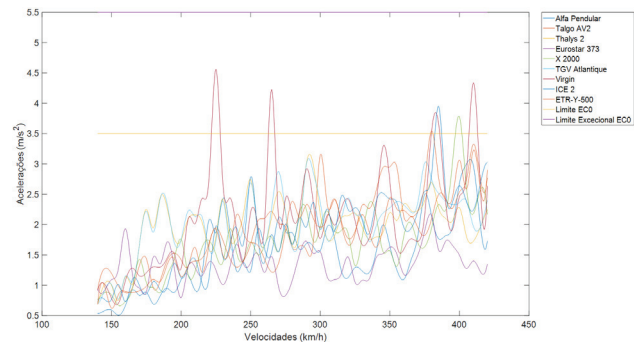


Figura 5 Comparação das acelerações máximas provocadas por cada comboio

Quadro 2 Aceleração máxima de cada comboio crítico e respetiva velocidade crítica

Comboio crítico	Velocidade crítica [km/h]	Aceleração máxima no nó central [m/s ²]
Alfa Pendular	405	2,998
X 2000	400	3,776
Virgin	225	4,564
ICE 2	385	3,952
ETR-Y-500	380	3,548

As análises efetuadas ao longo deste documento irão ter em atenção o Virgin, pois é o comboio que causa maiores acelerações no viaduto. Após o cálculo da evolução temporal das acelerações para cada comboio, procedeu-se ao cálculo dos mapas de acelerações máximas para todos os pontos da via balastrada e para a velocidade de circulação que leva à aceleração máxima no nó central de cada comboio crítico. Os mapas de acelerações máximas dos comboios foram calculados tendo em conta a aceleração máxima em cada ponto para todos os instantes de tempo de cada comboio e para cada velocidade de circulação, estando o valor representado em módulo. A escala de cores representa as acelerações mínima e máxima, em módulo, quando o comboio circula na ponte à velocidade indicada. Como se irá verificar nos mapas de acelerações máximas, nem sempre o ponto central da via é o que apresenta as maiores acelerações.

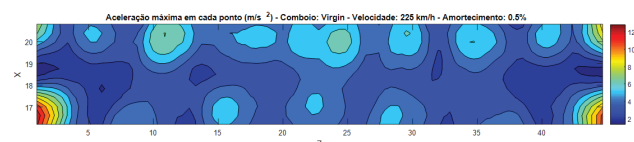


Figura 6 Mapa de acelerações máximas na via para o comboio Virgin à velocidade de 225 km/h

Na Figura 6 está representado o mapa de acelerações máximas para o comboio Virgin à velocidade de 225 km/h. Visualizando a figura, verifica-se que as maiores acelerações atingem-se nas extremidades, sendo que na restante via, a zona em consola (em cima na figura) é aquela que apresenta acelerações superiores a $3,5 \text{ m/s}^2$, em locais pontuais, existindo no lado esquerdo da via (em baixo na figura) três pontos relevantes acima dos $3,5 \text{ m/s}^2$.

5 Análise paramétrica da resposta dinâmica do viaduto

5.1 Ressonância da estrutura

Nesta secção pretende-se saber quais os modos que apresentam uma maior contribuição para o aumento das acelerações máximas a uma dada velocidade, verificando qual a frequência associada a esse modo e a respetiva deformada da estrutura. Para esta análise recorrem-se a gráficos que traduzem a aceleração máxima em função dos modos de vibração da estrutura. Estes gráficos terão em conta as velocidades de circulação vizinhas à velocidade de circulação que leva aos picos de acelerações máximas para o nó central da laje que se encontra na zona da via balastrada. Todas as análises desta secção foram realizadas para um amortecimento da estrutura equivalente ao mínimo regulamentar da EN1990-Anexo A2 [3], com o valor de 0,5% para todos os modos de vibração da estrutura.

5.1.1 Virgin

Com a análise da Figura 7 verifica-se que os modos que contribuem mais para o acréscimo das acelerações são o 78 e o 218, correspondendo a frequências de 26,24 Hz e 44,48 Hz, respetivamente, que foram verificadas através de uma Transformada Rápida de Fourier relativas ao sinal da passagem do comboio Virgin a 225 km/h, considerando 340 modos de vibração.

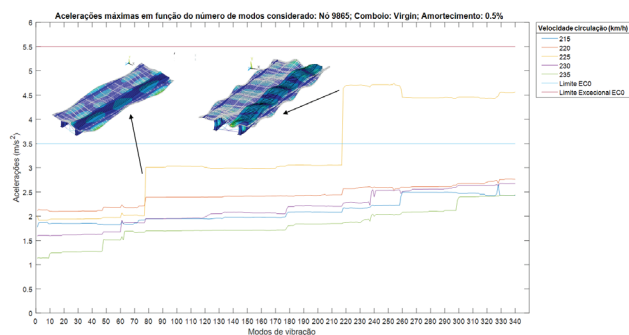


Figura 7 Influência dos modos de vibração para a aceleração máxima do Virgin

No Quadro 3 consegue-se relacionar a frequência de passagem das cargas do comboio Virgin, a uma velocidade de 225 km/h, com os

subarmónicos das frequências da estrutura dos modos identificados, verificando-se uma razão de frequências muito próxima de 1.

Quadro 3 Relação entre as frequências da estrutura e a frequência de passagem das cargas do Virgin

Frequência da estrutura [Hz]	Subarmónico da frequência da estrutura	Frequência da passagem das cargas [Hz]	Espaçamento entre eixos do comboio [m]	Razão de frequências (r)
26,24 (Modo 78)	5.º	4,37	14,3	0,9967
44,48 (Modo 218)	1.º	23,15	2,7	1,0347

5.2 Amortecimento da estrutura

O amortecimento é uma grandeza que tem influência na amplitude da resposta das acelerações, sendo que um amortecimento mais elevado leva a uma redução da amplitude em vibração livre mais expressiva. Nesta secção estudar-se-á a influência do amortecimento na resposta dinâmica da estrutura.

A gama de amortecimentos a analisar será de 3,71% para os modos globais da estrutura, 5,08% para os modos de vibração locais relacionados com a laje e 0,5% para os restantes modos de vibração relacionados com a estrutura metálica do viaduto [12]. Os resultados obtidos desta gama de amortecimentos serão comparados com os resultados obtidos quando o valor de amortecimento para todos os modos de vibração é de 0,5%.

5.2.1 Virgin

Na Figura 8 é apresentado o gráfico que traduz as acelerações máximas para cada velocidade de circulação do comboio Virgin, relativamente ao nó central da laje na zona da via balastrada. Repara-se no nó analisado que as acelerações máximas são praticamente inferiores em todo o seu espectro comparativamente a um amortecimento de 0,5% para todos os modos de vibração da estrutura. O pico de acelerações neste caso ocorre para uma velocidade de circulação de 410 km/h, sendo que os valores de aceleração neste ponto são cerca de 23% inferiores aos do modelo original com amortecimento de 0,5% para todos os modos de vibração.

Na Figura 9 apresenta-se o mapa de acelerações máximas para o comboio Virgin à velocidade de 410 km/h. Para esta velocidade, verifica-se que as extremidades são as zonas que atingem maiores acelerações enquanto na restante via as acelerações são bastante elevadas em zonas muito pontuais, mais respetivamente no lado direito da via (em cima na figura), sendo que à volta desses pontos existe uma diminuição rápida das acelerações, estando abaixo dos 5 m/s^2 .

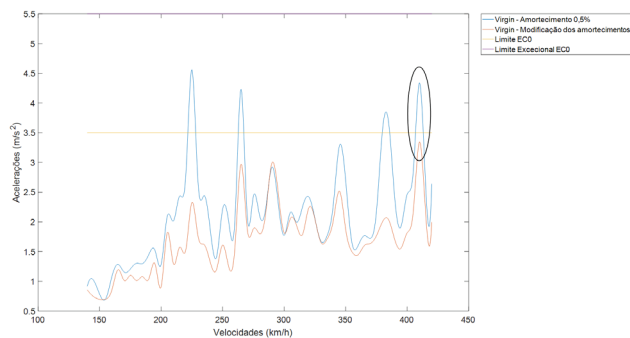


Figura 8 Acelerações máximas em função das velocidades de circulação para o Virgin (alteração dos amortecimentos da estrutura)

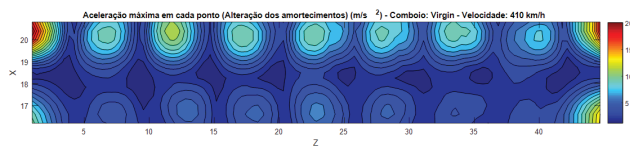


Figura 9 Mapa de acelerações máximas na via (alteração dos amortecimentos) para o comboio Virgin à velocidade de 410 km/h

6 Conclusões

Relativamente aos métodos usados, verifica-se que a análise dinâmica com cargas móveis exige pouco esforço computacional, pois não requer a modelação do comboio e pode ser usada com bastante precisão nos casos em que a interação ponte-comboio não influencia a resposta dinâmica da estrutura. O método da sobreposição modal mostra também muitas vantagens, sendo que permite obter de forma independente as coordenadas modais de cada comboio, dos deslocamentos modais. Assim para o cálculo dos deslocamentos, que seriam derivados para obter as acelerações, utilizaram-se as matrizes de coordenadas modais que já eram conhecidas. Quanto à ressonância da estrutura, verifica-se que há uma correlação entre as frequências da estrutura e as frequências de passagem dos comboios, notando-se que, a partir de um certo modo, o comboio Virgin ultrapassa o limite de $3,5 \text{ m/s}^2$. No que diz respeito ao amortecimento da estrutura, verifica-se que as acelerações são menores quando comparadas com um amortecimento de 0,5% para todos os modos de vibração. Isso dá boas indicações quanto às acelerações na via, pois trata-se de um cenário mais semelhante à realidade. Deste estudo pode-se tirar conclusões gerais relativamente a todos os mapas de acelerações máximas realizados. Verifica-se que nas zonas entre carris as acelerações são menores, sendo que as maiores acelerações são pontuais na maior parte dos comboios, não havendo, portanto, instabilização do balastro. As extremidades da via são as zonas que apresentam as maiores acelerações, pois não há dispersão das cargas quando o comboio entra no viaduto e estas

concentram-se na extremidade do carril. Uma alteração ao modelo, aumentando o comprimento dos carris para além da extremidade, ajudaria à redução dos valores de aceleração nestes pontos. Em praticamente todos os mapas verifica-se que as maiores acelerações ocorriam no lado direito da via. Isto deve-se ao facto de um dos carris se situar numa zona em consola do viaduto, agravando assim as acelerações nessas zonas.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: Projeto POCI-01-0145-FEDER-007457 – CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P.

Referências

- [1] European Commission (2008) – *Modern rail modern Europe: towards an integrated european railway area*, Office for Official publications of the European Communities.
- [2] ERRI D214/RP9 (2001) – Rail bridges for speeds > 200 Km/h final report ERRI D 214/RP 9. Utrecht, ERRI, European Rail Research Institute: [220] p.-[220] p.
- [3] EN1990 – Annex A2 (2005). *Eurocode: Basis of structural design - Annex A2: Application for bridges* (Normative). Brussels, CEN.
- [4] Zacher, M.; M. Baeßler (2008) – "Dynamic behaviour of ballast on railway bridges. Dynamics of High-Speed Railway Bridges". Selected and revised papers from the Advanced Course on "Dynamics of High-Speed Railway Bridges", Porto, Portugal, 20-23 September 2005, CRC Press.
- [5] Albuquerque, C. M. C. (2008) – *Comportamento dinâmico de pontes com tabuleiro ortotrópico em vias de alta velocidade*.
- [6] Ferreira, G. (2017) – *Análise à Fadiga de um Viaduto Ferroviário para Tráfego de Comboios de Alta Velocidade*.
- [7] ANSYS (1998) – ANSYS User's Manual.
- [8] Infraestruturas de Portugal (2017) – *Mapa da Rede Ferroviária*.
- [9] Teixeira Duarte (2010) – *Ponte Ferroviária sobre o Rio Sado e respetivos viadutos de acesso*.
- [10] Alencar, G. [et al.] (2016) – *Fatigue assessment of approach viaducts of the new Sado River railway crossing*.
- [11] EN1991-2 (2003) – *Eurocode 1: Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges*. Brussels, CEN.
- [12] Malveiro, J. [et al.] (2018) – "Model updating of a dynamic model of a composite steel-concrete railway viaduct based on experimental tests". *Engineering Structures* 164: 40-52.

