

## **Modelação probabilística da acção de tráfego em pontes ferroviárias em linhas de alta velocidade**



**José Rui Pinto<sup>1</sup>**



**Rui Calçada<sup>2</sup>**



**Francisco  
Calheiros<sup>3</sup>**

### **RESUMO**

O estudo do comportamento dinâmico de pontes sujeitas a tráfego de comboios de alta velocidade é bastante complexo, devido essencialmente aos fenómenos de ressonância que tendem a manifestar-se para velocidades superiores a 200 km/h. Neste trabalho foram investigados os efeitos dinâmicos resultantes da passagem de comboios de alta velocidade do tipo articulado, com geometria aleatória, em duas pontes tomadas como referência pela comissão de especialistas D124 do ERRI. Foi avaliada a evolução da estimativa da resposta com o número de simulações, em termos de valores médios, valores médios mais um desvio padrão e valores máximos. Os resultados relativos a deslocamentos e acelerações verticais do tabuleiro foram comparados com os obtidos através da aplicação dos comboios do modelo de carga HSLM.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Pontes ferroviárias; Alta velocidade; Efeitos dinâmicos de tráfego, Comboios articulados; Modelação probabilística.

<sup>1</sup> FEUP, Departamento de Engenharia Civil, 4200-465 Porto, Portugal / CASTELO. [josepinto@castelo.org](mailto:josepinto@castelo.org)

<sup>2</sup> FEUP, Departamento de Engenharia Civil, 4200-465 Porto, Portugal. [ruiabc@fe.up.pt](mailto:ruiabc@fe.up.pt)

<sup>3</sup> FEUP, Departamento de Engenharia Civil, 4200-465 Porto, Portugal. [xico@fe.up.pt](mailto:xico@fe.up.pt)

## 1. INTRODUÇÃO

Os recursos económicos disponíveis para a construção, manutenção, reparação e renovação de estruturas são limitados. Assim, existe hoje uma maior necessidade de se optimizarem os recursos disponíveis de forma a maximizar a sua utilidade para a sociedade. Neste contexto assume particular interesse o desenvolvimento de métodos probabilísticos para o dimensionamento de estruturas [1].

É sabido que os parâmetros que representam as acções e as resistências têm variabilidade aleatória e que os procedimentos tradicionais na avaliação das estruturas, envolvendo valores determinísticos, podem em muitos casos mostrar-se inadequados. Nos últimos 20 anos foi realizado um considerável esforço no desenvolvimento de abordagens baseadas em métodos probabilísticos em conjunto com o desenvolvimento de uma nova geração de códigos para o dimensionamento de pontes (AASHTO LRFD, 1998; OHBDC, 1991; CHBDC, 2000) [2].

O estudo do comportamento dinâmico de pontes sujeitas a tráfego de comboios de alta velocidade é bastante complexo, devido essencialmente aos fenómenos de ressonância que se tendem a manifestar para velocidades superiores a 200 km/h. Estes fenómenos dependem não só de características da ponte, mas também de características dos comboios e da via. A complexidade aumenta no caso de linhas interoperáveis, pois deverão ser calculadas de forma a atender aos efeitos dinâmicos induzidos por uma banda alargada de veículos [3].

Neste trabalho foram investigados os efeitos dinâmicos resultantes da passagem de comboios de alta velocidade do tipo articulado, com geometria aleatória, em duas pontes de referência indicadas no relatório RP4 da comissão de especialistas D124 do ERRI [4]. Foi avaliada a evolução da estimativa da resposta com o número de simulações, em termos de valores médios, desvio padrão e valores máximos. Os resultados relativos a deslocamentos e acelerações verticais do tabuleiro foram comparados com os obtidos através da aplicação dos comboios do modelo de carga HSLM - High Speed Load Model especificado na EN 1991-2 [5].

## 2. MODELO DE CARGAS HSLM

As especificações técnicas de interoperabilidade das linhas de alta velocidade (TSI, 2002) introduzem um conjunto de princípios que visam uniformizar e compatibilizar as diversas realidades europeias no que respeita às características da via, da rede de alimentação e de sinalização, ao tipo de material circulante e aos critérios de dimensionamento das infra-estruturas ferroviárias.

Com este intuito foi desenvolvido um modelo HSLM (“High Speed Load Model”) a utilizar no cálculo dinâmico de pontes. Este modelo foi desenvolvido pela comissão de especialistas ERRI D214, é constituído por dois modelos, HSLM-A e HSLM-B, os quais traduzem os efeitos dinâmicos dos comboios articulados, convencionais e regulares que circulam ou possam vir na rede de linhas interoperáveis europeias.

O modelo HSLM-A é constituído por dez esquemas de carga, com cargas por eixo variáveis entre 170 kN e 210 kN. O modelo deve ser utilizado em estruturas com vãos superiores a 7 m, e em pontes contínuas ou que possuam estrutura complexa com vãos inferiores a 7 m. A configuração típica do modelo HSLM-A encontra-se representada na Fig. 1. Para cada um dos comboios são definidos o número de carruagens intermédias (N), o comprimento das carruagens (D), a distância entre eixos (d) e a carga por eixo (P).

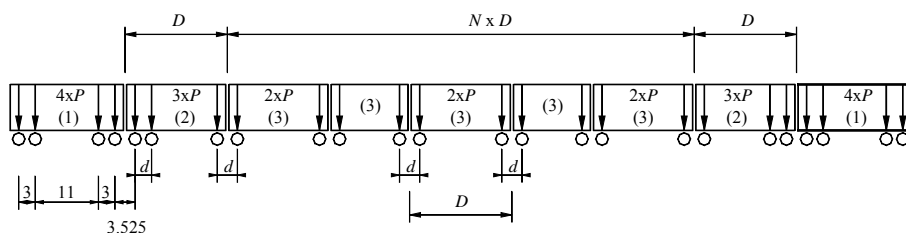


Figura 1: Modelo HSLM-A

No caso de estruturas com vãos inferiores a 7 m verificou-se que, para além do afastamento entre eixos  $D$ , também o afastamento entre eixos dos bogies  $d$  possui uma grande influência na agressividade do comboio.

O modelo de cargas que melhor se adequa a estas situações é designado por modelo HSLM-B, sendo constituído por uma sucessão de  $N$  cargas pontuais de 170 kN afastadas de uma distância regular  $d$  (Fig. 2).

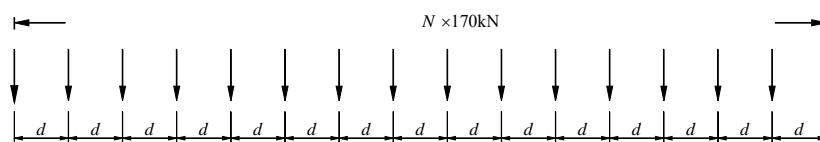


Figura 2: Modelo HSLM-B

No Anexo E da EN1992-1 são definidos os limites de validade de aplicação do modelo HSLM para comboios do tipo convencionais, articulados e regulares.

No caso de comboios articulados (Fig. 3), de que são exemplo os comboios Thalys, Eurostar e TGV, a carga máxima por eixo  $P$  é limitada a 170 kN, a distância  $D$ , correspondente ao comprimento da carruagem, ou à distância regular entre grupos de eixos, deve estar compreendida entre 18 m e 27 m, a distância  $d_{BA}$  entre eixos de um mesmo bogie deve situar-se entre 2,5 m e 3,5 m.

Além disso, o peso total do comboio é limitado a 10000 kN, o comprimento total a 400 m, e a massa não suspensa por eixo não deverá exceder 2 t.

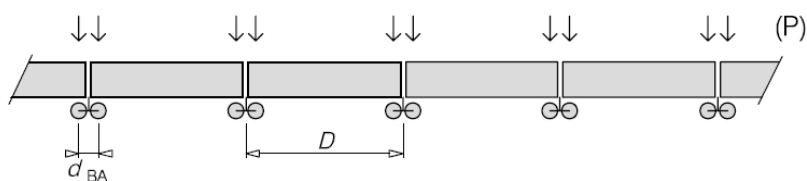


Figura 3: Comboio articulado

### 3. CENÁRIO DE SIMULAÇÃO

Os efeitos dinâmicos induzidos pelo tráfego ferroviário são dependentes de factores aleatórios relativos à ponte, à via e ao comboio.

A consideração simultânea da aleatoriedade associada a todos os factores envolvidos poderia introduzir uma complexidade excessiva na análise, tendo-se optado por considerar neste trabalho apenas a natureza aleatória dos parâmetros que caracterizam a geometria dos comboios.

### 3.1 Parâmetros relativos às pontes

Foram analisadas duas pontes, tomadas como casos de referência nos estudos da comissão D214 do ERRI.

A primeira ponte, designada de Ponte 1, é formada por um tramo simplesmente apoiado com vão  $L$  de 10 m, possui rigidez à flexão de  $1\,901\,560\text{ kN.m}^2$ , peso por unidade de comprimento de  $110\text{ kN/m}$ , a que corresponde uma frequência para o primeiro modo de vibração de  $6,47\text{ Hz}$ . A relação  $L/f$ , em que  $f$  é a flecha a meio vão para o modelo de cargas LM71 majorado pelo respectivo coeficiente dinâmico, é igual a 1000.

A segunda ponte, designada de Ponte 2, é igualmente formada por um tramo simplesmente apoiado mas com 20 m de vão. A rigidez à flexão é igual a  $12\,230\,850\text{ kN.m}^2$  e o peso por unidade de comprimento igual a  $150\text{ kN/m}$ . A frequência do primeiro modo de vibração é igual a  $3,51\text{ Hz}$ . Esta ponte apresenta também uma relação  $L/f$  de 1000.

### 3.2 Parâmetros aleatórios relativos aos comboios

Foram considerados comboios articulados com geometria aleatória, definida pelas variáveis aleatórias distância entre grupos de eixos regularmente espaçados ( $D$ ) e distância entre bogies, de acordo com os limites apresentados no anexo E da EN 1991-2.

A distância entre grupos de eixos regularmente espaçados ( $D$ ) foi assim tomada como uma variável aleatória com uma distribuição uniforme no intervalo  $[18,0; 27,0]$  (m). A distância entre bogies foi considerada uma variável aleatória com distribuição uniforme no intervalo  $[2,5; 3,5]$  (m).

O número de carruagens foi condicionado pelo comprimento máximo do comboio (404 m, que representa 1% acima do limite de 400 m) e pela carga total máxima (10000 kN).

### 3.3. Geração artificial das variáveis aleatórias

A simulação estocástica foi efectuada com base no método de Monte Carlo. Este método consiste na geração das variáveis aleatórias básicas,  $X(i) = (X1(i), X2(i), \dots, Xn(i))$ , tendo em conta as respectivas distribuições probabilísticas [6, 7, 8].

Segue-se uma análise determinística da resposta estrutural ( $Y(i)$ ) associada a cada grupo de variáveis básicas e finalmente faz-se o tratamento estatístico das respostas como uma amostra da distribuição de  $Y$ .

A simulação das variáveis básicas é feita através da geração sucessiva de números com distribuições idênticas às respectivas variáveis. Para o efeito, recorreu-se ao método da transformação inversa, o qual permite transformar uma distribuição uniforme no intervalo  $]0,1[$  na distribuição pretendida.

## 4. SIMULAÇÕES ESTOCÁSTICAS

### 4.1 Simulações realizadas

Foram efectuadas simulações para a passagem de comboios articulados com geometria aleatória circulando a velocidades entre 140 e 510 km/h, no caso da Ponte 1, e 140 e 420 km/h, no caso da Ponte 2. Foram considerados incrementos de velocidade  $10\text{ km/h}$ . A análise da resposta dinâmica foi efectuada com base no método de simulação de Monte-Carlo, considerando 500 simulações para cada uma das velocidades. O número total de simulações foi assim de  $33500 (500 \times 38 (\text{velocidades}) + 500 \times 29 (\text{velocidades}))$ .

Na Figura 4 apresentam-se para as 500 simulações, o número de carruagens do comboio (N) em função da distância entre grupos de eixos regularmente espaçados (D). É possível observar um aumento de N com a diminuição de D.

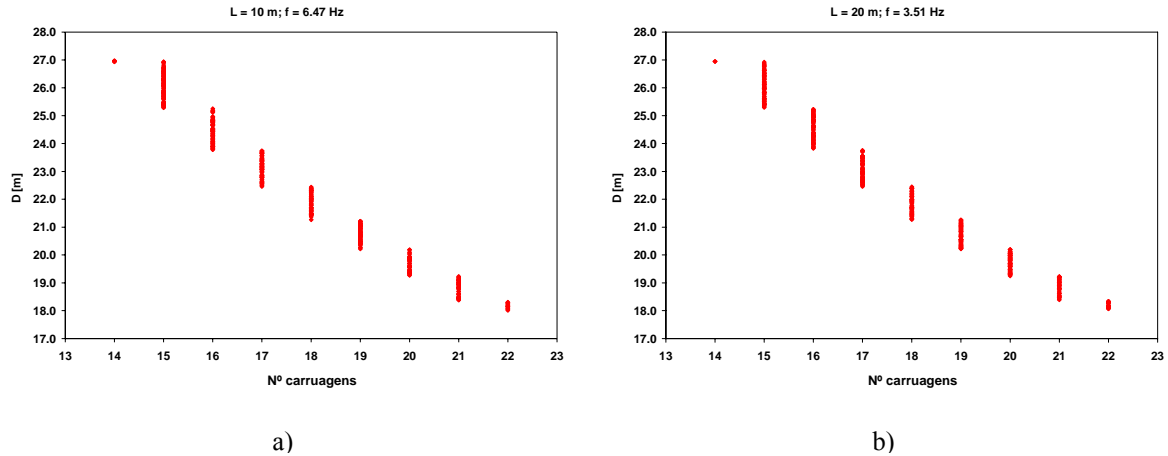


Figura 4: Número de carruagens do comboio (N) em função da distância entre grupos de eixos regularmente espaçados (D), para as 500 simulações: a) Ponte 1 e b) Ponte 2

## 4.2 Respostas dinâmicas

O sistema de equações diferenciais de equilíbrio dinâmico foi resolvido pelo método da sobreposição modal, considerando um incremento de tempo  $\Delta t = 0,003$  s e um coeficiente de amortecimento estrutural de 1%, para todos os modos de vibração da estrutura. Em cada simulação foram registados os valores máximos da aceleração e do deslocamento a meio vão da ponte.

Na Figura 5 apresentam-se respostas dinâmicas em termos da aceleração vertical a meio vão, correspondentes a duas simulações, à velocidade de 420 km/h, no caso da Ponte 1, e à velocidade de 320 km/h, no caso da Ponte 2.

A observação dos gráficos permite verificar que a diferença das respostas dinâmicas são fortemente influenciadas pela ocorrência de condições de ressonância. Por exemplo, para a Ponte 1, à velocidade  $v = 420$  km/h (116,67 m/s), na simulação 58 a distância regular entre grupo de eixos D é igual a 18,03 m, ou seja, a frequência de excitação da estrutura, dada por  $f = v/D$ , é igual a 6,47 Hz, e portanto praticamente coincidente com a 1ª frequência natural da ponte.

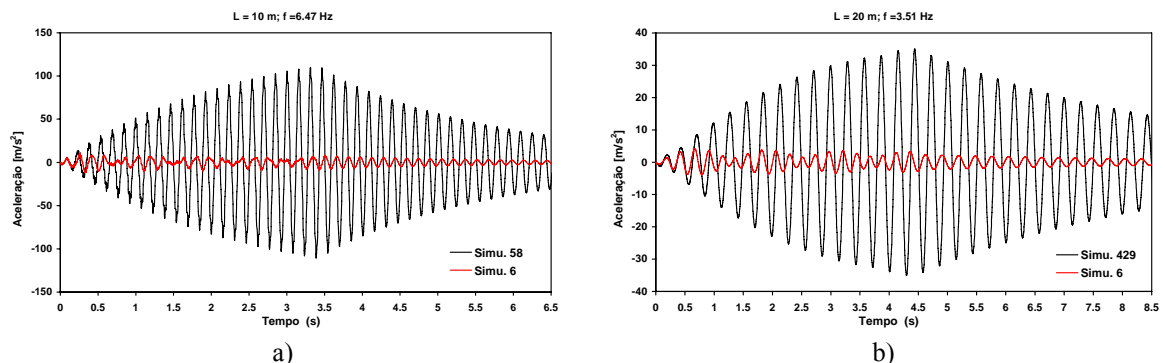


Figura 5: Evolução temporal da aceleração vertical a meio vão para duas simulações: a) Ponte 1,  $v = 420$  km/h e b) Ponte 2,  $v = 320$  km/h

## 4.3 Resultados das simulações

Na Figura 6 estão representados os valores máximos da aceleração vertical a meio vão obtidos para as diferentes simulações. A nuvem representativa das simulações para a Ponte 1 mostra que as ressonâncias podem ocorrer em duas bandas de velocidades. No caso da Ponte 2, podemos observar que as ressonâncias ocorrem apenas numa banda de velocidades. Para ambas as pontes a dispersão de resultados é muito significativa para velocidades em que ocorrem ressonâncias da estrutura.

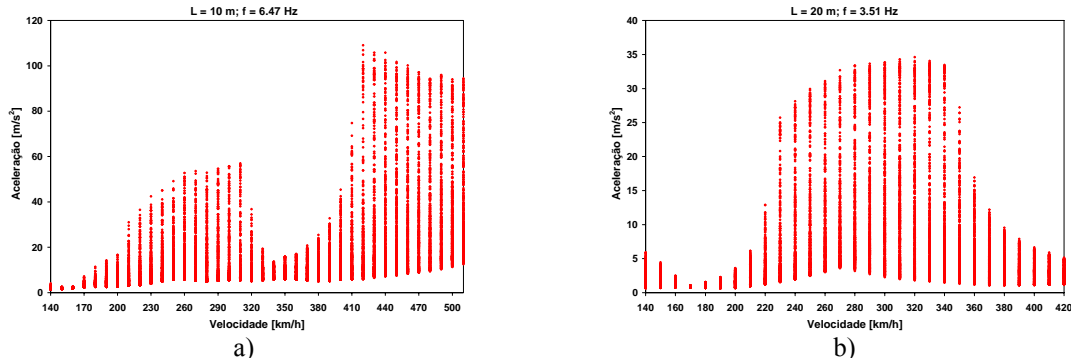


Figura 6: Valores máximos da aceleração vertical a meio vão obtidos para as 500 simulações em função da velocidade: a) Ponte 1 e b) Ponte 2

#### 4.4 Evolução da estimativa da resposta com o número de simulações

Na Figura 7 apresenta-se a evolução dos valores máximos da aceleração a meio vão com o número de simulações. Os resultados referem-se aos valores máximos obtidos para as velocidades em que se obteve o maior valor da aceleração. Nos gráficos encontram-se ainda representadas, além dos resultados das simulações, as curvas correspondentes à evolução dos valores médios e dos valores médios mais um desvio padrão. A observação dos gráficos permite constatar a existência de uma forte dispersão dos resultados, verificando no entanto que as estimativas em termos de valores médios e do desvio padrão tendem a estabilizar ao fim de aproximadamente 100 e 150 simulações, respectivamente para as pontes 1 e 2.

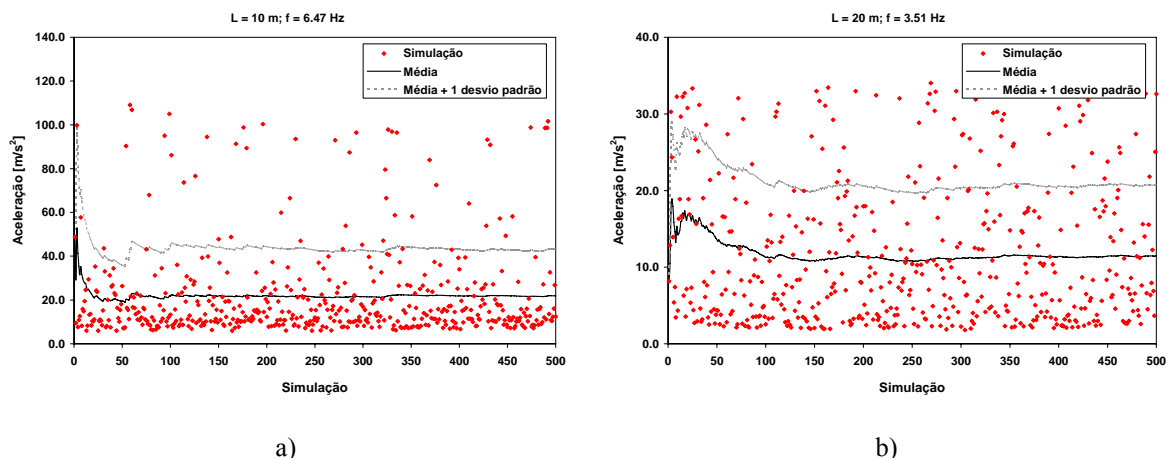


Figura 7: Evolução da aceleração vertical máxima com o número de simulações, para a velocidade em que ocorre o maior valor da aceleração: a) Ponte 1 e b) Ponte 2

Na Figura 8 apresenta-se ainda o mesmo tipo de resultados mas considerando para cada simulação não o valor máximo para uma velocidade fixa, mas sim o valor máximo obtido no intervalo  $[140, 510]$  e  $[140, 420]$  (km/h), respectivamente para as pontes 1 e 2.

Verifica-se uma forte redução da dispersão, o que se justifica pelo facto de, ao considerar-se todo o intervalos de velocidades, os valores máximos corresponderem sempre a velocidades da ressonância da estrutura, ao passo que, para uma velocidade fixa, apenas algumas simulações correspondem (ou encontram-se próximas) a condições de ressonância.

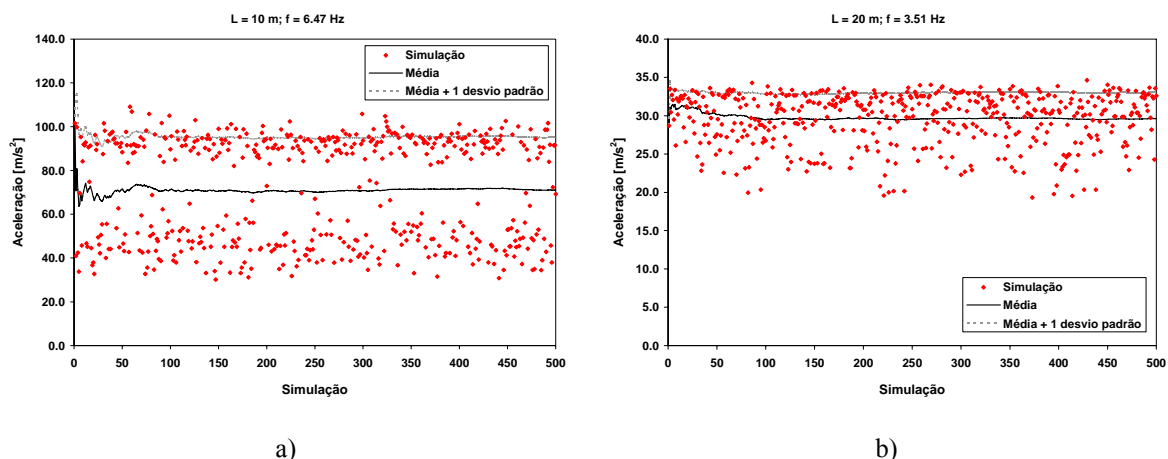


Figura 8: Evolução da estimativa da resposta com o número de simulações: a) Ponte 1 e b) Ponte 2

#### 4.5 Valores médios, médios mais um desvio padrão e máximos das respostas

Na Figura 9 apresentam-se os resultados relativos aos valores médios, médios mais um desvio padrão e máximos do deslocamento e aceleração a meio vão em função da velocidade. É possível verificar que as diferenças entre a envolvente dos valores máximos e a envolvente dos valores médios da aceleração vertical a meio vão se acentuam junto a velocidades de ressonância.

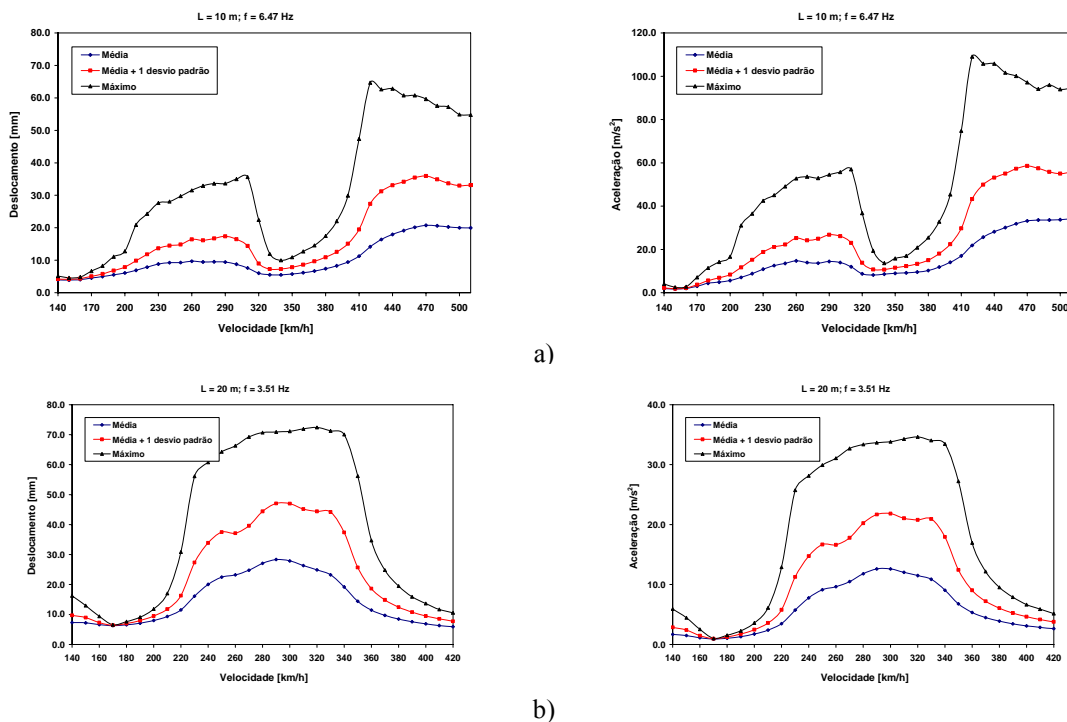


Figura 9: Resultados em termos de valores médios, médios mais um desvio padrão e máximos do deslocamento vertical e da aceleração vertical a) Ponte 1 e b) Ponte 2

#### 4.6 Comparação dos resultados das simulações e do modelo de cargas HSLM

Na Figura 10 são comparados os resultados das simulações com os resultados obtidos para comboios do modelo de cargas HSLM. É possível observar que os valores máximos são obtidos para o esquema de cargas HSLM.

Para a Ponte 1, o valor máximo da aceleração é alcançado com o comboio A1 ( $D = 18$  m,  $P = 170$  kN) à velocidade de 420 km/h. A diferença para a envolvente das simulações neste caso é pequena, 113,5 m/s<sup>2</sup> para 109,0 m/s<sup>2</sup>.

Para a Ponte 2 existe uma diferença significativa. O valor máximo da aceleração para o HSLM, 43,2 m/s<sup>2</sup>, é obtido com o comboio A10 ( $D = 27$  m,  $P = 210$  kN), enquanto o valor máximo da aceleração nas simulações é 33,5 m/s<sup>2</sup>, ambas registadas à velocidade de 340 km/h. Esta diferença é explicada pelo facto do modelo HSLM cobrir os efeitos não só dos comboios articulados, mas também dos convencionais e regulares, com cargas superiores às dos articulados que estão limitadas a 170 kN.

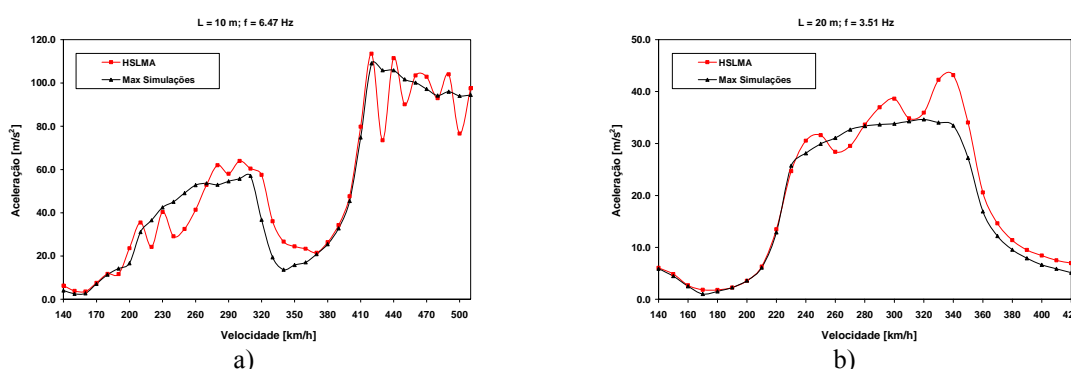


Figura 10: Comparação das envolventes dos valores máximos da aceleração vertical obtidas por simulação e para o modelo HSLM: a) Ponte 1 e b) Ponte 2

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram investigados os efeitos dinâmicos resultantes da passagem de comboios de alta velocidade do tipo articulado, com geometria aleatória, em duas pontes de referência indicadas no relatório RP4 da comissão de especialistas D124 do ERRI.

As respostas foram avaliadas em termos da evolução da estimativa da resposta com o número de simulações, em termos de valores médios, valores médios mais um desvio padrão e valores máximos. Os resultados relativos a deslocamentos e acelerações verticais do tabuleiro foram comparados com os obtidos através da aplicação dos comboios do modelo de carga HSLM.

Foi possível concluir que: i) as respostas dinâmicas variam fortemente consoante ocorram ou não condições de ressonância; ii) a dispersão de resultados é muito significativa para velocidades em que ocorrem ressonâncias da estrutura; iii) a evolução da estimativa da resposta com o número de simulações em termos dos valores médios e dos valores médios mais um desvio padrão tende a estabilizar ao fim de um número moderado de simulações; iv) considerando para cada simulação não o valor máximo das respostas para uma velocidade fixa, mas sim o valor máximo das respostas em toda a gama de velocidades é possível reduzir a dispersão; v) a comparação das envolventes dos valores máximos da aceleração vertical obtidos com as simulações e com a aplicação do modelo HSLM permitiu verificar a existência de diferenças com significado, explicadas pelo facto das simulações terem envolvido apenas comboios do tipo articulado, ao passo que o modelo HSLM envolve comboios do tipo convencionais e regulares, com cargas superiores às dos comboios articulados.

Os estudos exploratórios aqui apresentados enquadram-se numa primeira fase de um trabalho de doutoramento, com o qual se pretende contribuir para o estabelecimento de recomendações para o



dimensionamento de pontes ferroviárias em linhas de alta velocidade com base em técnicas probabilística de análise estrutural, nomeadamente identificando os parâmetros de maior sensibilidade e definindo estratégias simplificadas para a avaliação dos seus efeitos.

## **AGRADECIMENTOS**

Este artigo refere investigação realizada com o apoio financeiro da "FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia", Portugal. Os autores desejam também agradecer à RAVE pelo apoio disponibilizado no âmbito do protocolo RAVE & FEUP.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] Nowak, A.S., Thoft-Christensen, P. (2002) – “International contribution to the highways agency’s bridge related research”, Thomas Telford Publications, London.
- [2] Frangopol, D.M (1998) - “Probabilistic structural optimization”, Progress in Structural Engineering and Materials 1998 Vol I (2) pp 223-230.
- [3] TSI (2002) – “Technical Specification for Interoperability”, Official Journal of the European Communities.
- [4] ERRI D214/RP4.
- [5] EN1991-2 (2003) Actions on Structures - Part 2: General Actions – Traffic loads on bridges. European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- [5] Calheiros, F., Mean and Standard deviation In Mixtures, Actas das IX Jornadas de Classificação e Análise de Dados, Ed. CLAD, 24-27, 2002.
- [6] Henriques, A.A.R., Calheiros, F., Figueiras, J.(2002), Safety format for the design of concrete frames, Engineering computations- Int. J. computer aided Engineering and software, vol. 19 No. 3, pp.346-363, 2002.
- [7] Pinto, J. R. (2007) Dinâmica de Pontes em Viga Caixa em Linhas Ferroviárias de Alta Velocidade, Dissertação de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, FEUP, Porto.