

INFLUÊNCIA DAS IRREGULARIDADES DA VIA NA RESPOSTA DINÂMICA DE PONTES FERROVIÁRIAS DE MÉDIO VÃO

C. Rigueiro^{1*}, C. Rebelo² y L. Simões da Silva²

¹: Departamento de Engenharia Civil - EST
Instituto Politécnico de Castelo Branco
Av. Do Empresário
6000-767 Castelo Branco
e-mail: constanca@est.ipcb.pt

²: ISISE - Departamento de Engenharia Civil
FCT da Universidade de Coimbra
Pólo 2 da Universidade
3030-788 Coimbra

e-mail: {crebelo,luiss}@dec.uc.pt web: <http://www.isise.net>

Palavras-chave: Irregularidades, pontes ferroviárias, vibrações, balastro, alta velocidade

Resumo. *As irregularidades na via-férrea influenciam o comportamento dinâmico das pontes ferroviárias e aumentam os efeitos dinâmicos produzidos pela passagem dos eixos do comboio. Neste estudo é analisada a influência das irregularidades da via-férrea na resposta dinâmica de uma ponte, cuja primeira frequência natural de vibração se encontra sobre os limites definidos no Eurocódigo 1. São consideradas diferentes irregularidade:, isolada a meio-vão e contínua de amplitude aleatória existente em toda a extensão do carril. As respostas máximas da ponte com as irregularidades são determinadas em termos de deslocamentos e acelerações, e comparadas com as obtidas sem as irregularidades. Recorre-se ao modelo dinâmico de via-férrea balastrada ERRI,. São analisadas as acelerações na massa vibrante do balastro via-férrea bem como as forças de contacto entre a roda e o carril.*

1. INTRODUÇÃO

A determinação da resposta de pontes ferroviárias quando sujeitas à passagem do tráfego é um processo complexo que envolve a interacção entre o veículo e a estrutura. Por outro lado, a análise dinâmica é condicionada por diversos parâmetros relacionados com a ponte, veículos e via-férrea. A fim de evitar complicados cálculos onde a interacção entre o veículo e a ponte tem de ser considerada, em conjunto com os perfis de irregularidades da via-férrea, recorre-se geralmente ao incremento da resposta máxima estática por um factor de amplificação que de forma simplificada tem em conta estas irregularidades, [4]. Estudos mais recentes, [1] e [5], demonstraram que alguns dos critérios estabelecidos para a definição da amplificação dinâmica ϕ'' , não são válidos em todas as situações. Por exemplo as velocidades de circulação dos comboios são bastante superiores às admitidas, podem ir até aos 350 km/h, e que a expressão que permite o cálculo de ϕ' subestima os efeitos dinâmicos produzidos pelos actuais comboios de alta velocidade. Desta forma a *Comissão de Especialistas D214* desenvolveu estudos de modo a avaliar a validade da amplificação ϕ'' com o incremento da velocidade dos comboios e na situação de ressonância da ponte, [1] cujas principais conclusões são também apresentadas em [5]. Neste artigo apresenta-se a influência das irregularidades na via-férrea na resposta dinâmica de uma ponte, cujas características geométricas e mecânicas são tais que a sua primeira frequência natural de vibração se encontra sobre o limite definido na norma [4]. São considerados dois tipos de irregularidades: a isolada, posicionada a meio vão da ponte, portanto determinística, e a aleatória contínua, posicionada em toda a extensão do carril. As respostas máximas da ponte com as irregularidades são determinadas em termos de deslocamentos e acelerações, e comparadas com as obtidas sem a consideração das irregularidades.

Sendo certo que as irregularidades influenciam a resposta dinâmica dos veículos são também analisadas as acelerações nas massas suspensas dos eixos do comboio, as acelerações na massa vibrante do balastro e as forças de contacto entre o carril e a roda.

2. A PONTE E O MODELO DE VIA-FÉRREA UTILIZADOS NA ANÁLISE

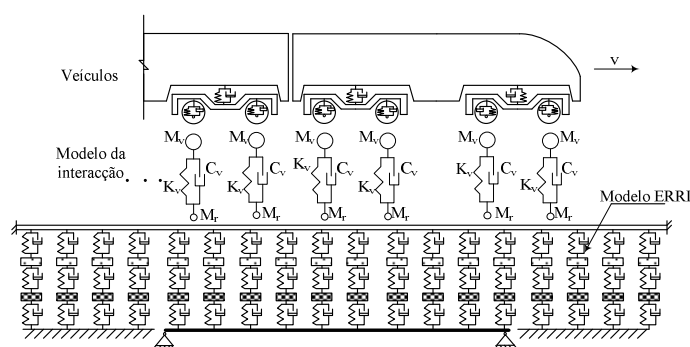


Figura 1. Modelo do sistema veículo/via-férrea/ponte para efectuar a interacção.

O modelo dinâmico de via-férrea considerado foi o modelo utilizado pela *Comissão de Especialistas D214*, para os estudos análogos a este [1]. Trata-se de um modelo bidimensional em que se modela o carril por intermédio de elementos de viga, cujas deformações atendem à teoria de Timoshenko, as travessas são consideradas por intermédio de massas concentradas ligadas superiormente ao carril e inferiormente ao balastro por um conjunto de mola e amortecedor de comportamento linear. A camada de balastro é considerada recorrendo a massas vibrantes sob as travessas e com as suas características de rigidez e amortecimento nas ligações entre a ponte e as travessas, os valores encontram-se tabelados em [1], ver Figura 1. A ponte considerada é simplesmente apoiada em betão pré-esforçado, com 23,5m de vão, existente na rede ferroviária da Áustria, [6].

Atendendo às propriedades dos materiais e à secção transversal da estrutura, $EI=18722000 \text{ kNm}^2$, sendo o valor da primeira frequência própria, $n_0=2,72 \text{ Hz}$. Trata-se pois de uma ponte muito flexível em que não está dispensada a análise dinâmica, mesmo para velocidades de circulação inferiores a 200 km/h. A relação L/δ_{LM71} para esta estrutura, onde δ_{LM71} representa o deslocamento máximo vertical a meio vão da ponte para a carga LM71, é de cerca de 1020. A utilização do factor φ'' está comprometida na medida em que a primeira frequência própria desta estrutura está aquém do limite inferior indicado em [4]. Desta forma, a quantificação de φ'' requer uma análise dinâmica onde a interacção entre o veículo e a estrutura é utilizada.

Para a análise efectuada admitiu-se a ponte dividida em cerca de 24 elementos de barra com cerca de 0,9792 m de extensão e o carril dividido em elementos de cerca de 0,4896 m de extensão. As estruturas adjacentes à ponte com elementos de barra com 1,0 m de extensão. Para o modelo simplificado de veículo, simulação do comboio de alta velocidade ICE2, foi considerado o modelo de massas suspensas, conforme representado na Figura 1, ou seja, foram admitidas para cada carruagem quatro sistemas de massas suspensas e não suspensas rolantes. O método utilizado na integração das equações de equilíbrio foi o de Wilson- θ , recorrendo a um intervalo de tempo igual a $\Delta t=0,002 \text{ s}$. O valor do coeficiente de amortecimento estrutural adoptado na ponte foi $\xi=1\%$ conforme [4] recomenda para vãos cujo comprimento $L \geq 20 \text{ m}$. Os coeficientes de Rayleigh α e β da matriz de amortecimento foram tais que para o primeiro e quarto modo de vibração da estrutura se verificasse o coeficiente de amortecimento igual a 1%.

3. AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DAS IRREGULARIDADES

3.1. Irregularidade isolada a meio-vão

Considerou-se uma irregularidade isolada segundo a vertical, localizada sobre o carril a meio-vão da ponte, igual à utilizada nos estudos efectuados pelas *Comissões de Especialistas D23 e D128* e posteriormente pela *D214*, [1] sendo definida por:

$$r(x) = \frac{1}{2} r_0 \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{L_{TD}} \right) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} r_0 = 6 \text{ mm} \wedge L_{TD} = 3 \text{ m}, & \quad 0 \leq x \leq L_{TD} & 10 \text{ m} \leq L \leq 20 \text{ m} \\ r_0 = 1 \text{ mm} \wedge L_{TD} = 1 \text{ m}, & \quad 0 \leq x \leq L_{TD} & L = 5 \text{ m} \end{aligned} \quad (2)$$

$$r(x) = 0 \quad x < 0 \wedge x > L \quad (3)$$

onde x é a distância percorrida no carril, r_0 é a máxima altura da irregularidade e L_{TD} o comprimento definido para a irregularidade.

3.1.1. Deslocamentos e acelerações na ponte

Para a análise dos efeitos das irregularidades admitiu-se a passagem do comboio de alta velocidade ICE2 a diferentes velocidades que variam entre os 140 e os 300 km/h ($1,2 \times 250$), com um intervalo de 5 km/h entre as velocidades consideradas, na zona de ressonância admitiu-se um menor incremento cerca de 2,5 km/h .

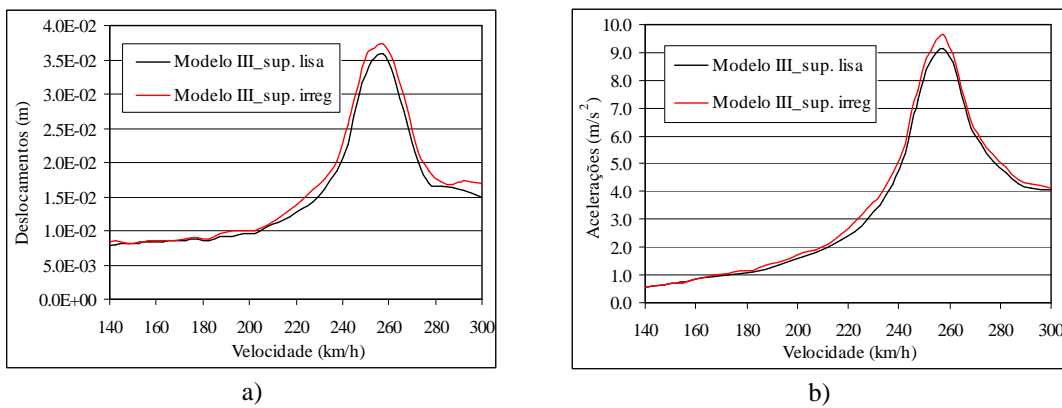


Figura 2. Comparação das respostas máximas da ponte sem e com a consideração da irregularidade isolada para diferentes velocidades: a) Deslocamentos; b) Acelerações.

A Figura 2 representam os valores máximos dos deslocamentos e das acelerações a meio vão da ponte, para diferentes velocidades de circulação do comboio, sem e com a irregularidade isolada na via-férrea. Conforme se pode constatar, a existência da irregularidade determina alterações nos valores máximos de deslocamentos e acelerações na ponte. A passagem dos sucessivos eixos regularmente espaçados de, 26,4 m, comprimento característico do ICE2, induzem a ressonância na ponte na velocidade de cerca de 257,5 km/h . Outras velocidades de ressonância inerentes ao primeiro modo de vibração não são visíveis neste varrimento, na medida em que são inferiores a 140 km/h . Por outro lado, as velocidades de ressonância correspondentes ao terceiro modo de vibração também não são visíveis pois correspondem a valores muito altos, superiores a 300 km/h .

De modo a avaliar a diferença entre as respostas da estrutura sem e com a consideração da irregularidade isolada, consideram-se os valores máximos dos deslocamentos e acelerações obtidos a meio vão da estrutura para essas situações e calcularam-se os coeficientes φ''_{cal} e $\varphi''_{acel,cal}$, respectivamente recorrendo a:

$$\varphi''_{cal} = \frac{\delta_{m\acute{a}x,irre}}{\delta_{m\acute{a}x}} - 1 \quad (4)$$

onde $\delta_{m\acute{a}x,irre}$ representa o deslocamento máximo vertical a meio vão da ponte considerando as irregularidades da via-férrea e $\delta_{m\acute{a}x}$ o deslocamento máximo vertical da ponte a meio vão sem a consideração das irregularidades, e

$$\varphi''_{acel,cal} = \frac{a_{m\acute{a}x,irre}}{a_{m\acute{a}x}} - 1 \quad (5)$$

onde $a_{m\acute{a}x,irre}$ e $a_{m\acute{a}x}$ correspondem aos valores máximos da aceleração vertical a meio vão da ponte com e sem a irregularidade na via-férrea, os resultados apresentam-se na Figura 3.

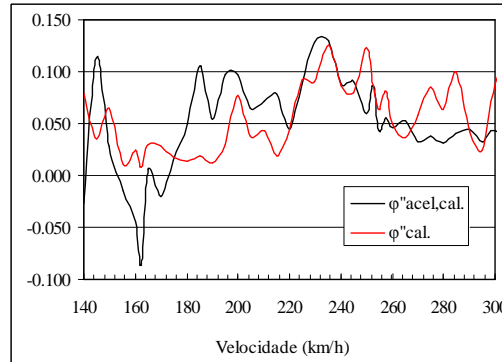


Figura 3. φ''_{cal} e $\varphi''_{acel,cal}$ dos deslocamentos e acelerações considerando uma irregularidade isolada.

Conforme se pode visualizar as maiores variações nos deslocamentos ocorrem, de uma forma geral, para as velocidades superiores a 220 *km/h*. Nas acelerações as maiores variações ocorrem para as velocidades compreendidas entre os cerca de 180 *km/h* e a velocidade de ressonância da ponte. De acordo com a Figura 3 poder-se-á dizer que a resposta da estrutura em termos de acelerações é mais sensível à existência das irregularidades. Para a velocidade de ressonância da ponte 257,5 *km/h*, $\varphi''_{cal}=0,036$ e $\varphi''_{acel,cal}=0,052$, para a velocidade de circulação de 180 *km/h*, $\varphi''_{cal}=0,014$ e $\varphi''_{acel,cal}=0,049$. Os valores máximos da φ''_{cal} e $\varphi''_{acel,cal}$ ocorrem para a velocidade de 235 *km/h*, assumindo 0,126 e 0,130, respectivamente.

Visualizando na Figura 4 as respostas em frequência das acelerações a meio vão da ponte, com e sem a irregularidade na via, para a passagem do comboio ICE2 à velocidade de 235 *km/h*, observa-se que a irregularidade no carril a meio vão da ponte introduz no cálculo da resposta da ponte uma maior participação das frequências superiores a 70 *Hz*. No entanto esta contribuição é ainda inferior à efectuada pelas frequências definidas pelo primeiro

modo de vibração da estrutura e às de excitação de menor ordem decorrentes da passagem do comboio ICE2.

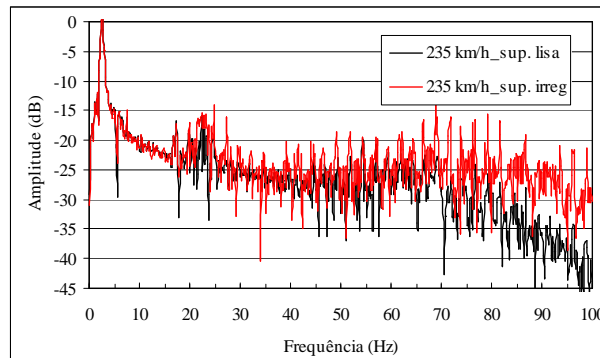


Figura 4. Comparação das respostas em frequência das acelerações a meio vão da ponte para a passagem do comboio ICE2 à velocidade de 235 km/h sem e com a irregularidade na via.

A fim de analisar os efeitos da irregularidade na via a meio vão da ponte apresentam-se de seguida as respostas nos vários elementos que constituem o sistema veículo/via-férrea/ponte para diferentes velocidades de circulação do comboio. Consideram-se as velocidades de 180, 257,5 e 235 km/h, na medida em que é para a velocidade de 180 km/h que os valores de $\varphi''_{\text{acel,cal}}$ começam a aumentar, 257,5 km/h é a velocidade de ressonância da ponte e por fim 235 km/h é a velocidade onde $\varphi''_{\text{acel,cal}}$ atinge o valor máximo. Para o quarto eixo do comboio, apresentam-se as forças de contacto entre a roda e a via e as acelerações na massa suspensa. As acelerações na massa vibrante do balastro da via localizado sobre o meio vão da ponte também vão ser aqui apresentadas.

3.1.2. As forças de contacto entre a roda e a via

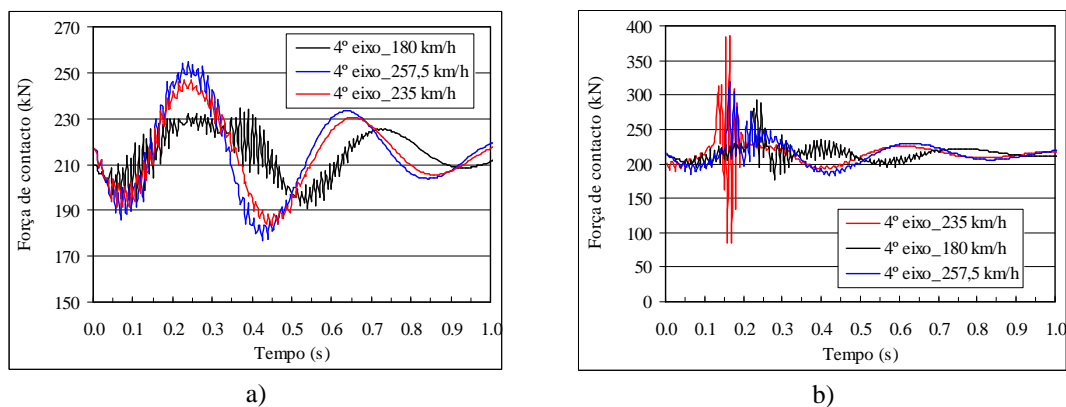


Figura 5. Força normal de contacto entre o 4º eixo da primeira carruagem do comboio e a via para diferentes velocidades: a) sem a irregularidade na via e b) com a irregularidade na via.

Representam-se na Figura 5a) os valores das forças normais de contacto entre o 4º eixo da

primeira carruagem do comboio e a via para diferentes velocidades, quando não é considerada qualquer irregularidade sobre o carril. O tempo representado equivale ao tempo necessário para que o eixo em questão passe sobre a ponte e a via-férrea, que se considera a jusante da ponte, à velocidade de 180 km/h . Conforme se pode observar pela Figura 5a), as forças normais de contacto entre o eixo e a via variam com a velocidade de circulação do comboio. Para velocidades crescentes observa-se o incremento das forças, na velocidade da ressonância da estrutura, as forças de contacto atingem cerca de 250 kN . A Figura 5b) representa os valores das forças normais de contacto entre o 4º eixo do comboio e a via, tendo em conta a existência da irregularidade a meio vão da ponte. Veja-se que existe uma acentuada variação das forças de contacto entre a roda e o carril quando o eixo do veículo passa sobre a irregularidade, cerca dos $0,235 \text{ s}$, para a velocidade de 180 km/h , $0,165$ e $0,179 \text{ s}$ para as velocidades de $257,5$ e 235 km/h , respectivamente. Embora esta variação seja crescente com a velocidade, os valores máximos não surgem na velocidade de ressonância mas sim na velocidade de 235 km/h , ultrapassando os cerca de 350 kN e pondo em causa a segurança da circulação na via.

3.1.3. As acelerações na massa suspensa

A Figura 6a) representa as acelerações que ocorrem na massa suspensa do 4º eixo do comboio ICE2 a diferentes velocidades sem a consideração da irregularidade. Conforme se pode observar as acelerações que ocorrem na massa suspensa atingem no máximo 2 m/s^2 para as velocidades na zona de ressonância, para a velocidade de 180 km/h a aceleração máxima é de cerca de 1 m/s^2 .

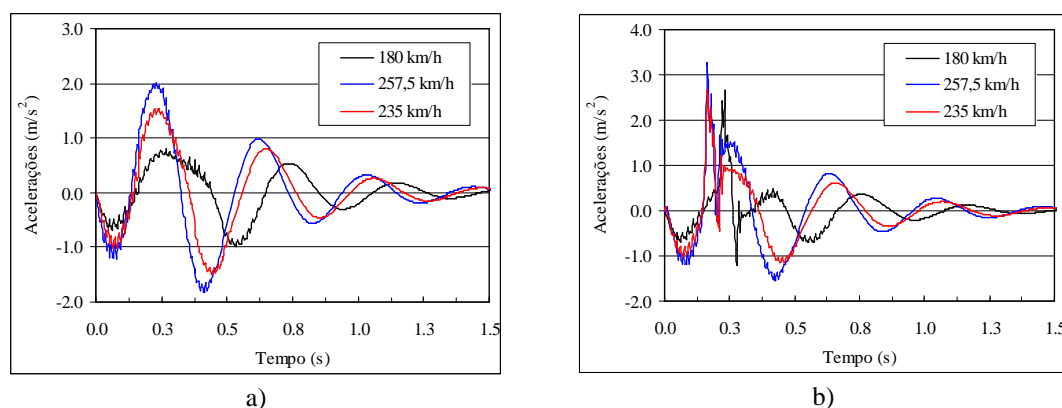


Figura 6. Acelerações na massa suspensa do 4º eixo da primeira carruagem do comboio para diferentes velocidades: a) sem a irregularidade na via e b) com a irregularidade na via.

A norma [7] na verificação do nível de conforto dos passageiros indica os seguintes valores para a aceleração máxima vertical nas carruagens para três níveis de conforto: Muito Bom 1 m/s^2 ; Bom $1,3 \text{ m/s}^2$; Aceitável 2 m/s^2 . Desta forma poder-se-á dizer que para as acelerações obtidas no primeiro veículo do comboio ICE2, as respostas se encontram dentro do nível de conforto de Muito Bom a Aceitável. A Figura 6b) representa

as respostas da massa suspensa para as diferentes velocidades de circulação do comboio ICE2 admitindo a irregularidade a meio vão. Conforme se pode constatar a existência da irregularidade a meio vão da ponte afecta o nível de conforto na carruagem para qualquer das velocidades consideradas pois determina um incremento das acelerações verticais para os cerca de 3 m/s^2 , o nível de conforto decresce para um nível inferior ao Aceitável.

3.1.4. As acelerações no balastro da via

A Figura 7a) representa as acelerações na massa vibrante do balastro da via-férrea para a passagem do comboio ICE2 à velocidade de 180 km/h sem e com a consideração da irregularidade isolada a meio vão. Conforme se pode observar a passagem da primeira e última carruagem do comboio sobre o meio vão da ponte determinam as maiores acelerações verticais no balastro. Este comportamento justifica-se na medida em que estas carruagens motoras têm forças por eixo superiores às das carruagens intermédias, 195 kN e 112 kN , respectivamente. A passagem do comboio sobre a via-férrea sem irregularidades determina na massa vibrante do balastro uma aceleração máxima vertical de cerca dos $1,7 \text{ m/s}^2$ e se a irregularidade na via for considerada as acelerações ultrapassam os 5 m/s^2 . De referir que as acelerações na ponte, sob o balastro, é de cerca de 1 e $1,04 \text{ m/s}^2$ sem e com a irregularidade na via, respectivamente.

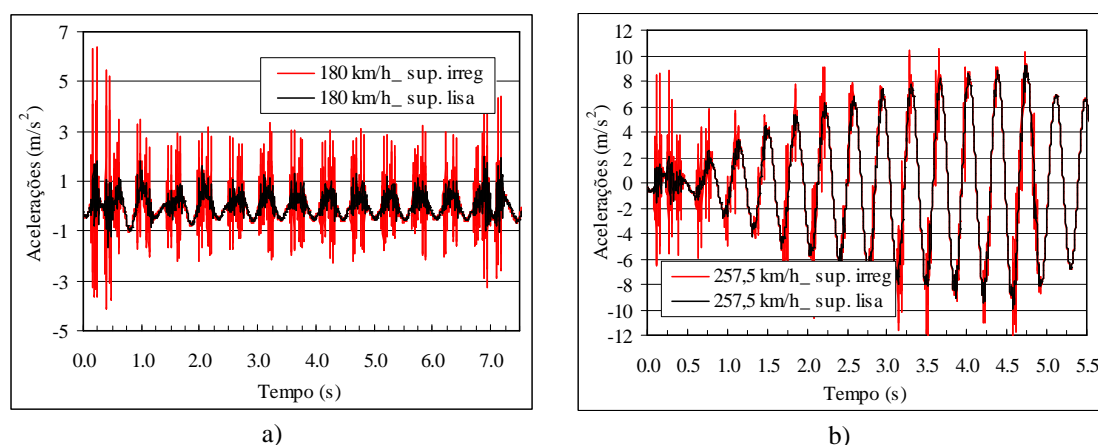


Figura 7. Acelerações na massa vibrante do balastro da via-férrea para a passagem do comboio ICE2 à velocidade: a) de 180 km/h e b) de $257,5 \text{ km/h}$.

Representando as acelerações na massa vibrante do balastro para a passagem do comboio à velocidade de $257,5 \text{ km/h}$, Figura 7b), observa-se que a presença das irregularidades na via incrementa as acelerações no balastro, este aumento é mais notório quando a primeira carruagem circula sobre o meio vão da ponte. As acelerações na massa vibrante do balastro aumentam com a velocidade de circulação do comboio. Na velocidade de ressonância, as acelerações na ponte, é de cerca de $9,2$ e $9,64 \text{ m/s}^2$ sem e com irregularidade na via, respectivamente. As acelerações no balastro chegam a alcançar os 12 m/s^2 , quando o último eixo do comboio abandona a ponte, aos cerca de $4,7 \text{ s}$.

A Figura 8 representa as acelerações na massa vibrante do balastro da via-férrea para a passagem do comboio ICE2 à velocidade de 235 km/h sem e com a consideração da irregularidade isolada a meio vão. Observando esta última situação, a passagem de cada eixo sobre o meio vão provoca no balastro acentuadas variações nas acelerações verticais. A passagem do comboio sobre a via-férrea sem irregularidade determina na massa vibrante do balastro uma aceleração máxima vertical de cerca dos 3 m/s² e se a irregularidade na via for considerada as acelerações alcançam os 8 m/s². De referir que as acelerações na ponte, sob o balastro, é de cerca de 3,01 e 3,4 m/s² sem e com irregularidade na via, respectivamente.

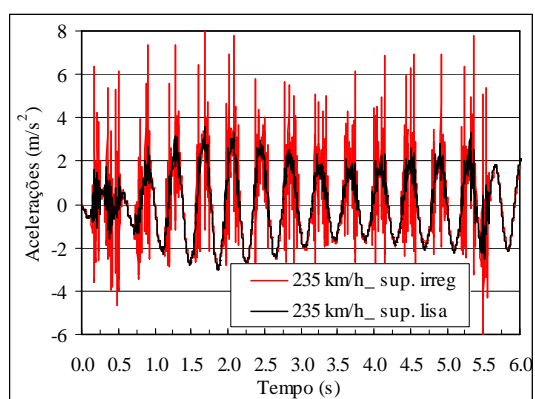


Figura 8. Acelerações na massa vibrante do balastro da via-férrea para a passagem do comboio ICE2 à velocidade de 235 km/h sem e com a irregularidade isolada a meio vão.

3.2. Irregularidade de amplitude aleatória contínua em todo o carril

Como se referiu anteriormente a análise dinâmica é condicionada por diversos parâmetros relacionados com a ponte, veículos e via-férrea em que alguns destes parâmetros são aleatórios e portanto dominados por incertezas estatísticas, como por exemplo: os que caracterizam a rigidez e amortecimento das suspensões dos veículos e dos elementos que constituem a via-férrea, bem como as irregularidades. Desta forma, uma apropriada aferição do comportamento dinâmico de pontes quando sujeitas ao tráfego requer a implementação de modelos probabilísticos que permitam a consideração de alguns destes parâmetros inerentes à via-férrea.

A avaliação dos efeitos derivados da consideração de irregularidades aleatórias na via-férrea é efectuada recorrendo à técnica de Monte-Carlo, em que diversos perfis de irregularidades são utilizados, gerados a partir de funções densidade espectral de potência de irregularidades da via-férrea correspondentes às diversas classes de qualidade da via.

Nesta secção apresenta-se uma metodologia para a análise do comportamento dinâmico de pontes ferroviárias quando sujeitas à passagem de comboio de alta velocidade tendo em conta as características aleatórias das irregularidades na via-férrea. Para tal a interacção entre os veículos, via-férrea e ponte é utilizada de acordo com as condições

descritas no item 2 e representadas na Figura 1.

É utilizado um apropriado modelo matemático que simula as irregularidades da via-férrea, baseado em processos estocásticos estacionários cujas características de probabilidade são estabelecidas recorrendo à função densidade espectral de potência. Esta função é definida de acordo com o tipo de irregularidade a simular e com a classe de qualidade da via, [2].

A simulação de perfis de irregularidades da via, compatível com uma dada função densidade espectral de potência, pode ser efectuada recorrendo à sobreposição de funções harmónicas cujas amplitudes sejam determinadas através das funções representativas das irregularidades da via, portanto para a coordenada global x , teremos:

$$r(x) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \cos(\Omega_i \cdot x - \theta_i) \quad (6)$$

onde Ω_i é a frequência da função harmónica i , A_i é a amplitude da harmónica i , θ_i é o ângulo de fase da harmónica i , de valor aleatório com distribuição uniforme de probabilidade no intervalo $[0, 2\pi]$, e n é o número total de harmónicas consideradas.

A amplitude A_i é determinada a partir da função densidade espectral de potência, $G(\Omega_i)$, representativa das irregularidades da via que se pretendem gerar, ou seja:

$$A_i = \sqrt{4 \cdot \Delta\Omega_i \cdot G(\Omega_i)} \quad (7)$$

onde $\Delta\Omega_i$ é o incremento da frequência considerado. As várias instituições ferroviárias propõem diferentes funções densidade espectral de potência para a determinação do perfil de irregularidades a considerar na via-férrea, conforme se pode ver em [8] ou em [2]. Considerou-se apropriado usar neste estudo as funções densidade espectral de potência da *Federal Railroad Administration* [2].

A expressão (8) representa a função densidade espectral de potência das irregularidades verticais de sobrelevação, os coeficientes intervenientes, A , Ω_1 e Ω_2 tomam diferentes valores dependendo da classe de irregularidade que se pretende considerar.

$$G_r(\Omega) = \frac{A\Omega_2^2}{(\Omega^2 + \Omega_1^2)(\Omega^2 + \Omega_2^2)} \quad [m^3/rad] \quad (8)$$

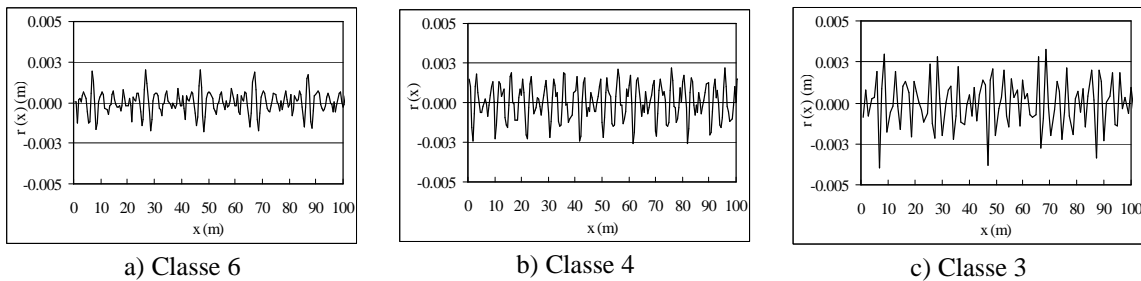


Figura 9. Irregularidades verticais de classe 6, 4 e 3, da via-férrea.

A Figura 9 representa três perfis de irregularidades de diferentes classes, classe 6, 4 e 3, para a via-férrea gerados artificialmente recorrendo à expressão (8) em que os coeficientes respectivos a cada classe assumem os valores de $A=0,59E-06 \text{ rad.m}$, $\Omega_1=23,3E-3 \text{ rad/m}$ e $\Omega_2=13,1E-2 \text{ rad/m}$ para a classe 6, e $A=1,38E-06 \text{ rad.m}$, $\Omega_1=23,3E-3 \text{ rad/m}$ e $\Omega_2=13,1E-2 \text{ rad/m}$ para a classe 4, e finalmente $A=2,16E-06 \text{ rad.m}$, $\Omega_1=23,3E-3 \text{ rad/m}$ e $\Omega_2=13,1E-2 \text{ rad/m}$ para a classe 3, [2]. Para a definição dos perfis de irregularidades tomaram-se valores da frequência espacial cíclica compreendida entre $0,209 \text{ rad/m} \leq \Omega \leq 209,44 \text{ rad/m}$ (ou $0,03 \text{ m} \leq \lambda_r \leq 30 \text{ m}$) de acordo com [3]. Conforme se pode observar na Figura 9, a classe de melhor qualidade é a classe 6, tendo em conta as condições a verificar nas vias de circulação dos comboios de alta velocidade, julgou-se conveniente recorrer a este tipo de perfil de irregularidades para a analisar a resposta da ponte.

3.2.1. Deslocamentos e acelerações na ponte

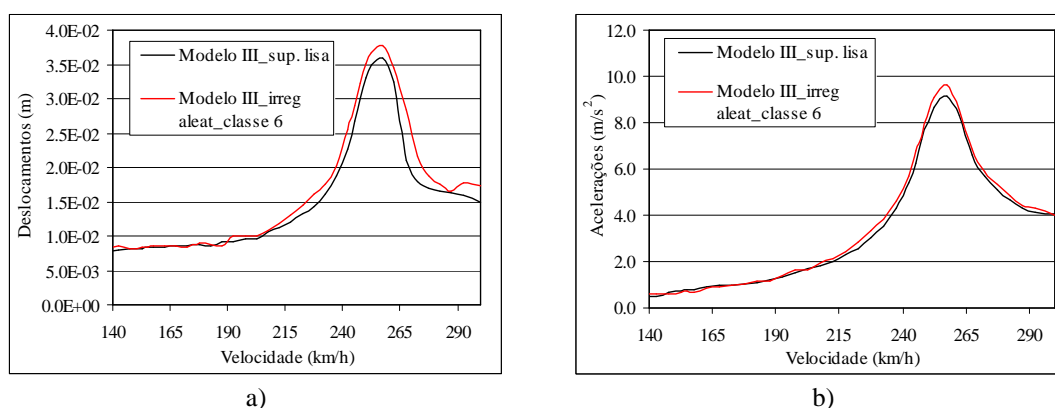


Figura 10. Comparação das respostas máximas da ponte sem e com a consideração de um perfil de irregularidades de classe 6 para diferentes velocidades: a) Deslocamentos; b) Acelerações.

Para as várias velocidades de circulação do comboio sobre a ponte, 140 a 300 km/h , determinaram-se as respostas máximas da ponte, os deslocamentos e acelerações a meio vão da ponte. A Figura 10 efectua a comparação entre os valores máximos dos deslocamentos e das acelerações a meio vão da ponte, para diferentes velocidades de circulação do comboio, considerando a via-férrea sem e com um perfil de irregularidades artificialmente gerado de classe 6. Conforme se pode constatar nestas figuras, a existência de irregularidades na via-férrea, mesmo com uma classe de irregularidades referente a boa qualidade, determina a alteração dos valores máximos dos deslocamentos e das acelerações.

De modo a visualizar os efeitos das irregularidades aleatórias na resposta da ponte determinaram-se os valores de φ''_{cal} e $\varphi''_{acel,cal}$, cujos resultados se apresentam na Figura 11. De uma forma geral poder-se-á dizer que os maiores valores de φ''_{cal} e $\varphi''_{acel,cal}$ resultam para as velocidades compreendidas entre os 200 e 257,5 km/h , velocidade de

ressonância da ponte. Assim para a velocidade de ressonância da ponte $257,5 \text{ km/h}$, $\varphi''_{cal}=0,047$ e $\varphi''_{acel,cal}=0,052$, e para a velocidade de circulação 235 km/h , onde ocorrem os valores máximos φ''_{cal} e $\varphi''_{acel,cal}$, $0,126$ e $0,113$, respectivamente.

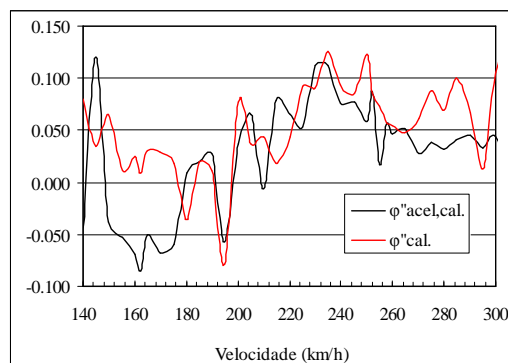


Figura 11. Comparação das acelerações máximas a meio vão da ponte, com e sem a consideração de um perfil de irregularidades de classe 6.

Determinaram-se os efeitos das irregularidades na resposta dinâmica da ponte recorrendo à técnica de Monte-Carlo em que 50 perfis de irregularidades de classe 6 foram artificialmente gerados recorrendo à equação (6) e adoptando os valores correspondentes para o cálculo de $G(\Omega)$ segundo (8). A análise da resposta dinâmica do sistema veículo/via-férrea/ponte foi determinada considerando apenas a velocidade de circulação do comboio ICE2 igual a $257,5 \text{ km/h}$. Os valores máximos, dos deslocamentos e acelerações, foram considerados e deles foram determinados os valores médios, variâncias e desvios padrão.

A Tabela 1 e 2 representam os parâmetros estatísticos, de localização e dispersão, caracterizadores dos valores obtidos para os deslocamentos e acelerações máximas a meio vão da Ponte considerando 50 perfis de irregularidade de classe 6.

Perfil de irregularidades de classe 6					
v [km/h]	$\delta_{m\acute{a}x,abs}$ [m]	μ_{δ} [m]	σ_{δ}^2 [m ²]	σ_{δ} [m]	$\mu_{\delta}+\sigma_{\delta}$ [m]
257,5	3,77E-02	3,64E-02	0,39E-06	0,63E-03	3,70E-02

Tabela 1. Parâmetros estatísticos, de localização e de dispersão caracterizadores dos valores obtidos para os deslocamentos máximos da secção de meio vão da ponte.

Perfil de irregularidades de classe 6					
v [km/h]	$a_{m\acute{a}x,abs}$ [m/s ²]	μ_a [m/s ²]	σ_a^2 [m ² /s ⁴]	σ_a [m/s ²]	$\mu_a+\sigma_a$ [m/s ²]
257,5	9,74	9,36	3,62E-02	0,194	9,55

Tabela 2. Parâmetros estatísticos, de localização e de dispersão caracterizadores dos valores obtidos para as acelerações máximas da secção de meio vão da ponte.

Tendo em conta que o deslocamento máximo e a aceleração máxima a meio vão da ponte,

sem a consideração de irregularidades, é igual a $3,60E-02 m$ e $9,16 m/s^2$, respectivamente, pode-se concluir que a consideração das irregularidades de classe 6 determina, tendo em conta os respectivos valores médios, $\varphi''_{cal.}=0,011$ e $\varphi''_{acel,cal.}=0,022$. Portanto a consideração de irregularidades de classe 6 determina um pequeno incremento dos deslocamentos e acelerações a meio vão da ponte para a circulação do comboio na velocidade de $257,5 km/h$.

O factor de amplificação dinâmico é dado por:

$$FAD = \frac{R_{dyn}}{R_{est.}} \quad (9)$$

onde R_{dyn} e $R_{est.}$ são a máxima resposta dinâmica e a máxima resposta estática, respectivamente para diferentes classes de irregularidades e velocidades admitidas.

A Tabela 3 representa os parâmetros estatísticos, de localização e dispersão, caracterizadores dos valores obtidos para o factor de amplificação.

Perfil de irregularidades de classe 6			
v [km/h]	FAD _{máx. abs}	μ_{FAD}	$\mu_{FAD} + \sigma_{FAD}$
257,5	4,96	4,79	4,87

Tabela 3. Factor de amplificação dinâmica (FAD) dos deslocamentos obtidos recorrendo à simulação de Monte Carlo para a secção de meio vão da ponte.

O factor de amplificação dinâmico sem a consideração de irregularidades é igual a 4,74. Assim, o facto de o valor médio calculado para este coeficiente ser elevado, cerca de 4,79, deriva da sensibilidade que a ponte apresenta aos efeitos dinâmicos sem a consideração das irregularidades.

A fim de visualizar os efeitos das irregularidades, das classes de menor qualidade da via, na resposta da ponte, do veículo e da massa vibrante do balastro, dois perfis de irregularidades de classe 4 e classe 3 foram determinados. Para cada um dos perfis de irregularidades foi determinado o factor de amplificação dos deslocamentos verticais a meio vão da ponte para as velocidades de 180 e $257,5 km/h$, Tabela 4.

Perfil de irregularidades de classe 6		Perfil de irregularidades de classe 4		Perfil de irregularidades de classe 3	
v [km/h]	FAD	v [km/h]	FAD	v [km/h]	FAD
180	1,16	180	1,19	180	1,20
257,5	4,78	257,5	4,80	257,5	4,94

Tabela 4. Factor de amplificação dinâmica (FAD) dos deslocamentos obtidos recorrendo a vários perfis de irregularidades.

Apesar de se tomar apenas um perfil de irregularidades para as classes 4 e 3, os resultados permitem observar que a resposta da ponte é sensível ao nível de irregularidades existentes na via-férrea e à velocidade de circulação do comboio sobre a ponte. Recordar que a não consideração de irregularidades na via-férrea implica para a velocidade de 180

km/h um factor de amplificação de cerca de 1,13. A velocidade do comboio igual a $257,5 km/h$ e a consideração do perfil de irregularidades da classe 3, a de menor qualidade, implica o incremento do factor de amplificação dinâmica em cerca de 4%

3.2.2. Forças de contacto entre a roda e o carril

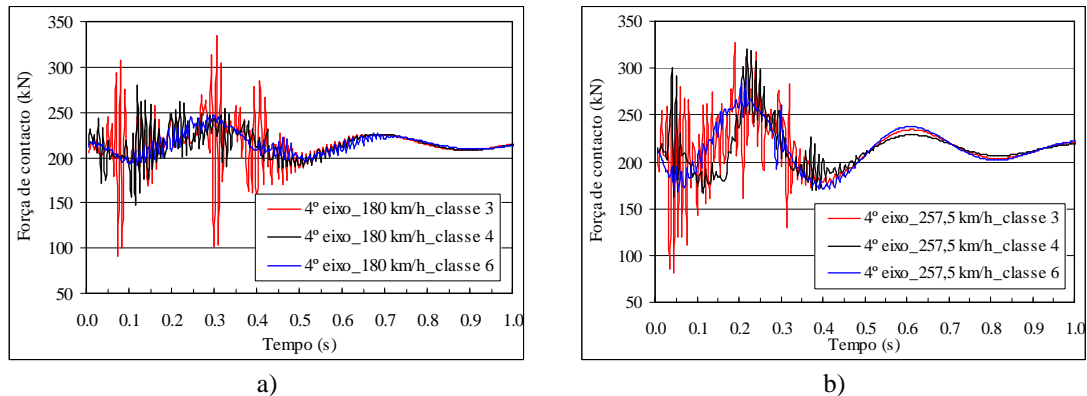


Figura 12. Comparação das forças normais de contacto entre o 4º eixo do comboio e o carril considerando perfis de irregularidades das classes de 3, 4 e 6 para a velocidade: a) de 180 km/h; b) de 257,5 km/h.

A Figura 12 representa a comparação entre as forças normais de contacto entre o 4º eixo do comboio e a via, considerando perfis de irregularidades das classes 3, 4 e 6 na via-férrea para as velocidades de circulação de 180 e $257,5 km/h$. Na Figura 12a) observa-se que durante os 0,7 s em que o eixo entra na ponte e sai da via-férrea, considerada a jusante da ponte, as forças de contacto sofrem variações, mesmo com as irregularidades referentes ao perfil de classe 6. Para a velocidade de circulação de $257,5 km/h$, Figura 12b), o perfil de irregularidades de classe 3, colocado em toda a extensão da via-férrea, provoca uma acentuada variação das forças de contacto, entre a roda e a via, durante os cerca de 0,47 s em que o eixo entra na ponte e sai da via-férrea adjacente, a jusante da ponte.

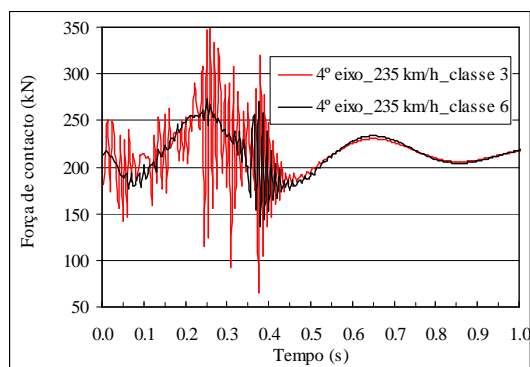


Figura 13. Comparação das forças de contacto entre o 4º eixo do comboio e o carril para a velocidade de 235 km/h e para perfis de irregularidades das classes de 3 e 6

A Figura 13 representa a comparação entre as forças normais de contacto entre o 4º eixo do comboio e a via considerando perfis de irregularidades das classe 3 e 6 na via-férrea e a velocidade de circulação de 235 km/h. Observa-se que a passagem dos eixos sobre a via com as irregularidades da classe 3, durante cerca de 0,5 s, provoca grandes variações nas forças de contacto entre o eixo e a via-férrea, pondo em causa a segurança da circulação na via. Portanto nas velocidades observadas, a consideração do perfil de irregularidade de menor qualidade, classe 3, introduz variações significativas nas forças de contacto entre o eixo e o carril pondo em causa a verificação da segurança da circulação na via.

3.2.3. As acelerações na massa suspensa

A Figura 14 efectua a comparação das acelerações na massa suspensa considerando perfis de irregularidades da classe 6, 4 e 3 para as velocidades de circulação de 180 e de 257,5 km/h. Conforme se pode visualizar a consideração de irregularidades altera os valores das acelerações nas carruagens, por exemplo na situação do perfil da classe 6, a aceleração ultrapassa o 1 m/s², portanto o nível de conforto passa de Muito Bom para Bom. Quando na consideração de um perfil de irregularidades da classe 3, o nível de conforto na carruagem passa para um nível inferior ao aceitável, Figura 14a).

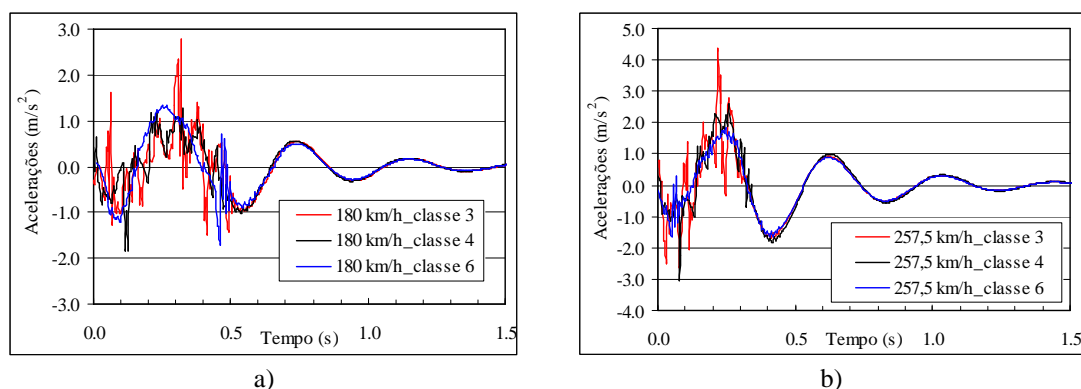


Figura 14. Comparação das acelerações na massa suspensa do 4º eixo do comboio ICE2 considerando perfis de irregularidade da classe 6,4 e 3 para a velocidade de circulação de: a) 180 km/h; b) 257,5 km/h.

Na velocidade de ressonância, 257,5 km/h as irregularidades também se fazem sentir, mas neste caso, provocam uma ligeira redução das acelerações mantendo-se portanto no nível de conforto Aceitável. Os valores das acelerações, na massa suspensa quando o perfil de irregularidades da classe 3 é utilizado, são bastante elevados sendo o nível de conforto dos passageiros inferior ao Aceitável, Figura 14b).

Já para a velocidade de 235 km/h, observa-se que a consideração do perfil de irregularidades de classe 6 determina um incremento tal nas acelerações da massa suspensa que provoca uma diminuição do nível de conforto de Bom para um nível inferior ao Aceitável, Figura 15. Os valores das acelerações, na massa suspensa quando o perfil de irregularidades da classe 3 é utilizado, são bastante elevados sendo o nível de conforto dos passageiros inferior ao Aceitável.

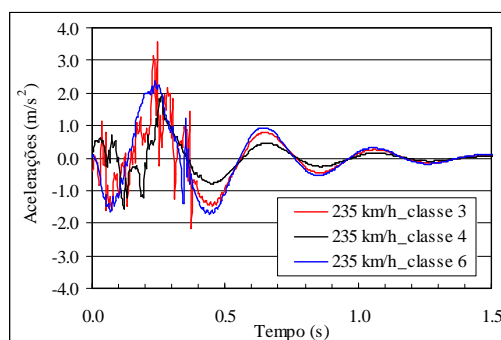


Figura 15. Comparação das acelerações na massa suspensa do 4º eixo do comboio ICE2 para a velocidade de circulação de 235 km/h considerando perfis de irregularidades da classe 6, 4 e 3.

3.2.4. As acelerações no balastro da via

A Figura 16 representa a comparação entre as acelerações na massa vibrante do balastro da via-férrea para a passagem do comboio ICE2 à velocidade de 180 km/h sem e com os perfis de irregularidades das classe 6 e 3. A Figura 16a) permite constatar que a consideração das irregularidades da classe 6 não provoca alterações significativas nas acelerações verticais. No entanto a consideração do perfil de irregularidades da classe 3 determina um incremento das acelerações no balastro de cerca dos 1,7 m/s^2 para os cerca de 3,3 m/s^2 . De referir que as acelerações na ponte para esta velocidade de circulação é de cerca de 1 e 1,13 m/s^2 sem e com irregularidade na via, respectivamente.

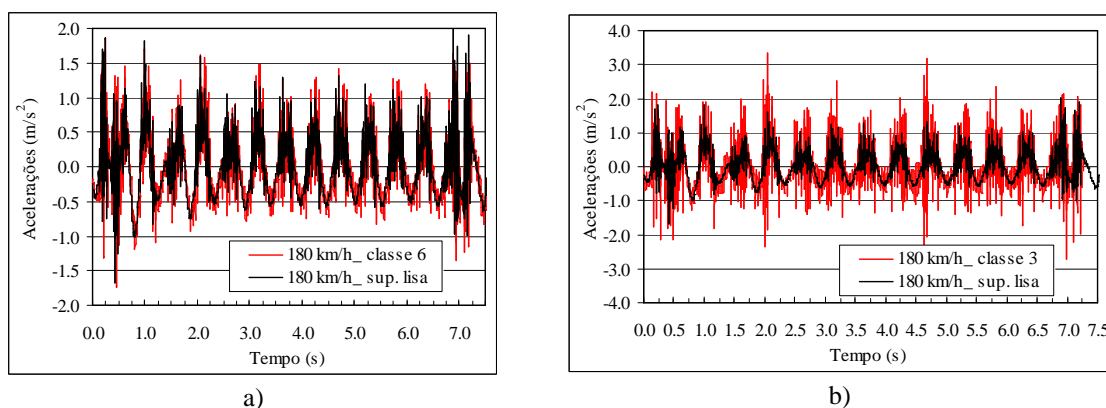


Figura 16. Comparação das acelerações no balastro para a velocidade de circulação de 180 km/h: a) sem e com o perfil de irregularidades da classe 6, b) sem e com o perfil de irregularidades da classe 3.

Representando as acelerações na massa vibrante do balastro para a passagem do comboio à velocidade de 257,5 km/h, Figura 17, constata-se que com a ponte em ressonância já não é possível observar a passagem de cada eixo sobre o balastro. Nesta situação verifica-se que a consideração das irregularidades de diferentes classes não determina incrementos acentuados nas acelerações no balastro, portanto as acelerações no balastro são idênticas

às acelerações verticais que ocorrem na ponte. De referir que as acelerações na ponte sem e com o perfil de irregularidades da classe 3 são iguais a $9,2$ e $11,1 \text{ m/s}^2$, respectivamente. A consideração de um perfil de irregularidades da classe 6 e a passagem do comboio à velocidade de 235 km/h também não determina incrementos significativos nas acelerações do balastro, Figura 18a), tal não se passa com a consideração de um perfil de irregularidades de classe 3 na via-férrea pois as acelerações verticais no balastro, passam de cerca de $1,5 \text{ m/s}^2$ para cerca de 4 m/s^2 .

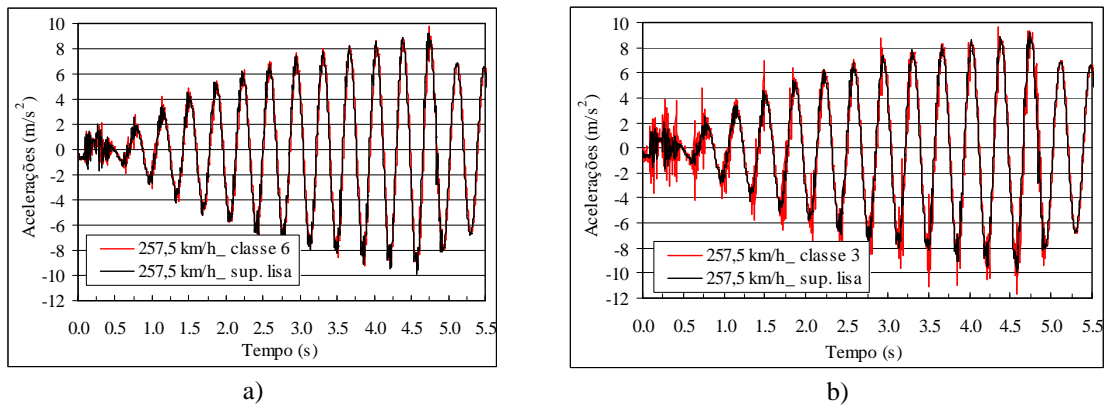


Figura 17. Comparação das acelerações no balastro para a velocidade de circulação de $257,5 \text{ km/h}$: a) sem e com o perfil de irregularidades da classe 6, b) sem e com o perfil de irregularidades da classe 3.

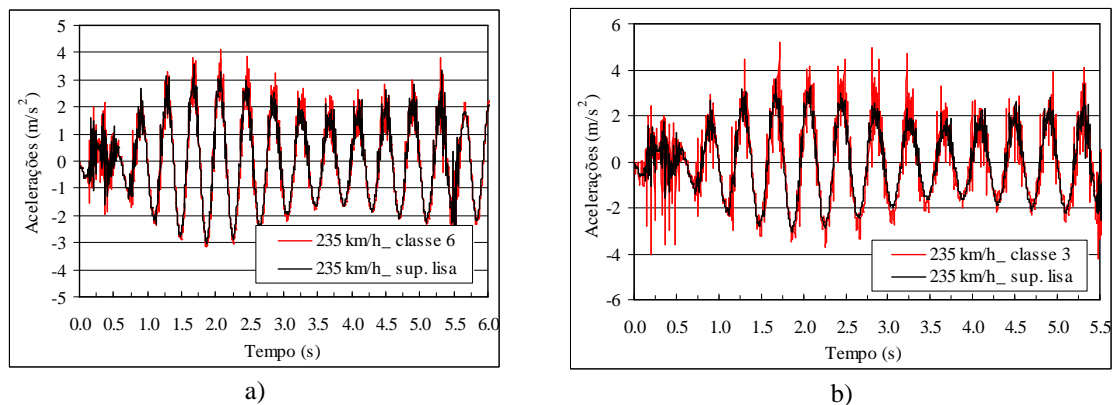


Figura 18. Comparação das acelerações no balastro para a velocidade de circulação de 235 km/h : a) sem e com o perfil de irregularidades da classe 6, b) sem e com o perfil de irregularidades da classe 3.

4. CONCLUSÕES

Analisou-se a resposta do sistema veículo/via-férrea/ponte, em que a ponte é bastante sensível aos efeitos dinâmicos, e quando na via-férrea são impostos duas irregularidades distintas: uma irregularidade isolada e uma irregularidade aleatória contínua em toda a extensão do carril. A consideração de uma irregularidade isolada a meio-vão da ponte, corresponde a uma

deformação do tipo sinusoidal de 6 mm de altura em 3 m de extensão e permitiu retirar várias conclusões. Na ponte, provoca um aumento dos valores máximos dos deslocamentos e acelerações a meio vão, essencialmente nas velocidades compreendidas entre os 180 e os 257 km/h, a velocidade de ressonância da ponte. A variação máxima dos deslocamentos e acelerações na ponte é de cerca de 13% e acontece quando o comboio circula à velocidade de 235 km/h. Quanto à resposta da ponte no domínio da frequência, constatou-se que a consideração da irregularidade no carril introduz no cálculo uma maior participação das frequências superiores a 70 Hz, no entanto esta contribuição é inferior à efectuada pelas frequências definidas pelo primeiro modo de vibração da estrutura e de excitação. As respostas em termos de acelerações nas massas suspensas permitem concluir que a existência deste tipo de irregularidade é bastante desfavorável, pois o nível de conforto dos passageiros decresce para um nível inferior ao Aceitável. No balastro, as respostas obtidas demonstram que as acelerações verticais chegam a duplicar nas velocidades compreendidas entre os 180 e os 257 km/h. Na velocidade de ressonância, as acelerações no balastro são elevadas, acompanhando a grandeza de acelerações que ocorrem na ponte. No entanto a diferença que ocorre entre as acelerações no balastro e na ponte é inferior à que ocorre nas restantes velocidades analisadas. Relativamente às forças de contacto entre a roda e o carril, foi possível observar que as variações que ocorrem são de tal ordem que está posta em causa a segurança da circulação na via. Desta forma, é possível concluir que a existência de uma irregularidade isolada de 6 mm de altura em 3 m de extensão é bastante desfavorável numa via de alta velocidade, pois apesar de não imputar variações significativas na resposta da ponte, põe em causa a segurança da circulação na via e o conforto dos passageiros.

A avaliação dos efeitos derivados da consideração de irregularidades aleatórias na via-férrea foi efectuada recorrendo à técnica de Monte-Carlo, em que diversos perfis de irregularidades foram admitidos, gerados a partir de funções de densidade espectral de potência de irregularidades correspondentes a diversas classes de qualidade da via. Para tal consideraram-se as funções de densidade espectral de potência da Federal Railroad Administration, [2], em que as frequências espacial cíclicas variam entre os $0,209 \text{ rad/m} \leq \Omega \leq 209,44 \text{ rad/m}$ [3]. Tomando um perfil de irregularidades de classe 6, foram determinadas as respostas máximas da ponte, em termos de deslocamentos e acelerações, considerando velocidades de circulação do comboio compreendidas entre os 140 e os 300 km/h. As respostas obtidas permitiram averiguar que as variações que ocorrem nos deslocamentos e acelerações são análogas às verificadas quando na consideração da irregularidade isolada a meio-vão. Recorrendo à geração de 50 perfis de irregularidade de classe 6, foram determinados os deslocamentos e acelerações a meio vão para a circulação do comboio ICE à velocidade de 257,5 km/h. Estes resultados permitiram a determinação dos parâmetros estatísticos, valores médios e desvios padrão, bem como do factor de amplificação dinâmica. Os valores obtidos permitiram concluir que a consideração da irregularidade da classe 6 não implica significativas variações na resposta da ponte.

Foi ainda determinada a resposta da ponte, ainda para a velocidade de circulação do comboio igual a 257,5 km/h, quando dois perfis de irregularidade da classe 4 e 3 são admitidos, o que permitiu aferir que a estrutura é sensível ao nível de irregularidades existente na via. As forças

de contacto entre a roda do 4º eixo e o carril foram determinadas considerando os três perfis de irregularidades, 3, 4 e 6 e permitiu concluir que ao contrário dos perfis de irregularidade de classe 4 e 6, a consideração do perfil de irregularidades da classe 3 determina elevadas forças de contacto entre a roda e o carril. As variações que ocorrem são de tal modo elevadas que põem em causa a verificação da segurança da circulação da via. Relativamente às acelerações verticais na massa suspensa do 4º eixo do primeiro veículo do comboio ICE2, constata-se que a consideração do perfil de irregularidades da classe 6 diminui o nível de conforto dos passageiros em qualquer das velocidades analisadas. A consideração do perfil de irregularidades da classe 3 demonstra ser bastante desfavorável para o conforto dos passageiros, pois as acelerações verticais na massa suspensa são superiores às que o nível de conforto Aceitável estabelece. As acelerações no balastro não sofrem variações significativas quando a irregularidade da classe 6 é considerada na via. No entanto, a consideração do perfil de irregularidades da classe 3 determina significativas variações nas acelerações do balastro. Atendendo ao estudo efectuado poder-se-á dizer que a classe de irregularidades considerada na via influencia a resposta deste género de estruturas. No entanto a influência é mais desfavorável para o veículo que circula e para os elementos que constituem a via do que para o viaduto, podendo colocar em causa tanto o conforto dos passageiros como a segurança da circulação na via nomeadamente através da destabilização do balastro e do contacto entre a roda e o carril.

REFERÊNCIAS

- [1] ERRI D214/RP5, “Railway bridges for speeds > 200km/h, Numerical Investigations of the effect of track irregularities at bridge resonance, European Rail Research Institute, Railway Technical Publications, 1999.
- [2] [Fryba, 1996] Fryba L., “Vibration of Solids and Structures under Moving Loads”, Thomas Telford, 1972.
- [3] [Yang *et al.*, 2004a] Yang Y.B., Yau J.D., Wu Y.S., Bridge Interactions Dynamics with Applications to High-Speed Railways. World Scientific, 2004.
- [4] EN1991-2, “Actions on structures – Part 2: General actions – Traffic loads on Bridges”, European Committee for Standardization, CEN, 2003.
- [5] [ERRI D214/RP9, 1999] ERRI D214/RP9, “Rail Bridges for Speeds >200km/h. Final Report, European Rail Research Institute, Railway Technical Publications, 1999.
- [6] Rebelo C., Simões da Silva L., Rigueiro C., Pircher M., “Dynamic behaviour of twin single-span ballasted railway viaducts – Fields measurements and modal identification”, Engineering Structures, Março 2008.
- [7] EN1990-Annex A2, “Basis of structural design – Annex A2 – Application for bridges (normative)”, European Committee for Standardization, CEN, 2005.
- [8] ORE C116/RP1 “Interaction between vehicles and track”, Office for Research and Experiments of the International Union of Railways, Utrecht, 1971.