

## **Análise dinâmica de uma via em laje para tráfego ferroviário de alta velocidade**



**Cecília Vale<sup>1</sup>**



**José M. Goicolea<sup>2</sup>**



**Felipe Gabaldón<sup>3</sup>**



**Rui Calçada<sup>4</sup>**

### **RESUMO**

Neste artigo analisa-se numericamente o comportamento dinâmico de um sistema de via ferroviária em laje para tráfego de comboios de alta velocidade.

De entre os vários tipos de via existentes seleccionou-se o sistema Rheda 2000, que consiste na última versão de via da família Rheda, tendo sido já aplicado em várias linhas europeias, tais como a HSL – South, na Holanda, a HSL Nuremberg-Ingolstadt, na Alemanha, e no túnel de Guadarrama, em Espanha. Começa por descrever-se as características do sistema de via Rheda 2000, referindo-se as suas vantagens e desvantagens em relação a uma via clássica balastrada.

Posteriormente, apresenta-se o estudo numérico levado a cabo, referindo-se não só os modelos de via, de veículo e de contacto utilizados nos cálculos numéricos, como também alguns aspectos do cálculo. Utilizou-se o programa de cálculo de elementos finitos FEAP, desenvolvido na Universidade de Berkeley.

Por fim, o comportamento dinâmico da via é avaliado para diferentes velocidades de circulação, em termos das respostas relativas a: deslocamentos máximos de carril sobre apoios e entre apoios; forças nos sistemas de fixação; tensões de flexão na laje, nos casos de via perfeita e via com irregularidades.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Via ferroviária; Alta velocidade; Análise dinâmica; Comportamento estrutural; MEF.

<sup>1</sup> Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. [cvale@fe.up.pt](mailto:cvale@fe.up.pt)

<sup>2</sup> Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid. [goicolea@mecanica.upm.es](mailto:goicolea@mecanica.upm.es)

<sup>3</sup> Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid. [felipe@mecanica.upm.es](mailto:felipe@mecanica.upm.es)

<sup>4</sup> Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. [ruiabc@fe.up.pt](mailto:ruiabc@fe.up.pt)

## **1. INTRODUÇÃO**

A via ferroviária tem como funções principais guiar o comboio de modo seguro e económico e suportar as solicitações que actuam sobre a estrutura ferroviária. A escolha do tipo de via, balastrada ou não balastrada, deve ser baseada numa análise multicritério, tendo em conta as vantagens e desvantagens de cada tipo; a experiência acumulada; a rapidez e disponibilidade ou não de balastro; o custo no ciclo de vida de cada tipo de via; os aspectos ambientais (ruído e vibrações); o tipo de manutenção e de reparações previstas.

Como vantagens da via não balastrada, em relação à via balastrada, há a referir, entre outras, a maior vida útil; a menor manutenção; a possibilidade de melhor ajuste dos sistemas de fixação em casos de substituição de carris. As maiores desvantagens deste tipo de vias são o custo elevado de construção e um nível de ruído mais elevado, em relação a vias não balastradas, havendo, no entanto, dispositivos que o minimizam.

Existem várias famílias de vias não balastrada, indicadas em [1]. O sistema Rheda 2000 (Fig. 1) consiste na última versão de via da família Rheda, tendo sido já aplicado em várias linhas europeias, tais como a HSL – South, na Holanda, a HSL Nuremberg-Ingolstadt, na Alemanha, e no túnel de Guadarrama, em Espanha. É constituído por uma laje de betão apoiada sobre uma camada estabilizada com cimento, com travessas integradas na estrutura de betão, não sendo, por isso, elementos substituíveis em operações de reparação e/ou manutenção.



Figura 1. Sistema Rheda 2000.

O objectivo da análise numérica apresentada neste artigo é compreender o comportamento estrutural dinâmico de um sistema de via ferroviária em laje – sistema Rheda 2000 - para tráfego de comboios de alta velocidade, a partir de resultados numéricos de análises dinâmicas obtidos para diferentes velocidades de circulação e perfis de irregularidade da via.

## **2. ESTUDO NUMÉRICO**

Nesta secção, apresentam-se os modelos de via, de veículo e de interacção entre roda e carril utilizados no estudo numérico, assim como os perfis de irregularidade considerados. Posteriormente, indicam-se e analisam-se os resultados obtidos. Neste estudo numérico, utilizou-se o software de elementos finitos – FEAP, desenvolvido na Universidade de Berkeley.

### **2.1 Modelos de via**

Na Figura 2 apresenta-se um esquema do modelo de via utilizado na análise do sistema Rheda 2000. Considerou-se um modelo com 97,5 m de extensão. Dado estar a estudar-se apenas a resposta estrutural da via na direcção vertical, teve-se em conta a simetria do modelo em relação a um plano

longitudinal. O carril foi simulado por 600 elementos de viga de Bernoulli; cada palmilha foi modelada por um conjunto constituído por uma mola e um amortecedor em paralelo; a parte da travessa não incorporada na laje foi considerada como sendo uma massa pontual; a laje e o leito de betão pobre foram definidos por elementos de estado plano de deformação de oito nós. Relativamente às condições de apoio, considerou-se que os extremos da via estão livres. Há ainda a referir que o espaçamento dos apoios pontuais do carril sobre a laje é de 0,65 m, espaçamento corrente entre travessas numa via Rheda 2000. A fundação foi simulada por molas espaçadas 0,1625 m.

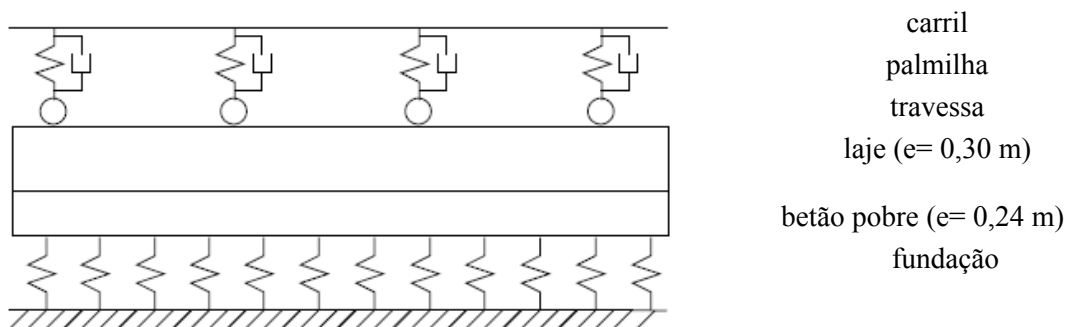


Figura 2. Esquema de via ferroviária em laje.

No Quadro 1, indicam-se os parâmetros mecânicos de cada um dos elementos da via [2].

Quadro 1. Parâmetros mecânicos dos elementos da via.	
<i>Elemento da via</i>	<i>Parâmetro</i>
Carril	UIC 60
Palmilha	$k_{est} = 22,5 \text{ kN/mm}$ ; $k_{din} = 40 \text{ kN/mm}$ ; $c = 8 \text{ ks/m}$
Travessa não embebida	$m = 30 \text{ kg}$ ; $d = 0,65 \text{ m}$
Laje de betão	$E = 34 \text{ GPa}$ ; $\nu = 0,2$ $A = 0,384 \text{ m}^2$ ; $I = 0,0018432 \text{ m}^4$
Betão pobre	$E = 10 \text{ GPa}$ ; $\nu = 0,3$
Fundação	$k = 130 \times 10^6 \text{ N/m}^2$

com:  $k_{est}$ ,  $k_{din}$  – rigidez estática e dinâmica da palmilha;  $c$  – amortecimento da palmilha;  $m$  – massa da travessa não embebida;  $d$  - espaçamento entre travessas;  $E$  – módulo de elasticidade;  $\nu$  – coeficiente de Poisson;  $A$  – área,  $I$  – inércia;  $k$  – rigidez vertical da fundação.

## 2.2 Modelos de veículo

Os veículos ferroviários podem ser convencionais, articulados ou regulares. Neste trabalho, considerou-se o comboio ICE 3, um veículo convencional de alta velocidade, cujas características mecânicas se indicam no Quadro 2.

Quadro 2. Características mecânicas do comboio ICE 3.

Parâmetro	Valor
Massa do conjunto eixo-roda, $M_e$ (kg)	1516
Massa do bogie, $M_b$ (kg)	2790
Rigidez da suspensão primária, $k_1$ (N/m)	$1,61 \times 10^6$
Amortecimento da suspensão primária, $c_1$ (Ns/m)	$0,75 \times 10^4$
Carga por eixo, $P$ (N)	170000

Relativamente aos modelos que simulam, em 2D, um eixo do veículo, estes podem ser: carga móvel; modelo de 1/2 eixo; modelo de 1/4 de bogie; modelo de 1/8 de veículo (Fig. 3).

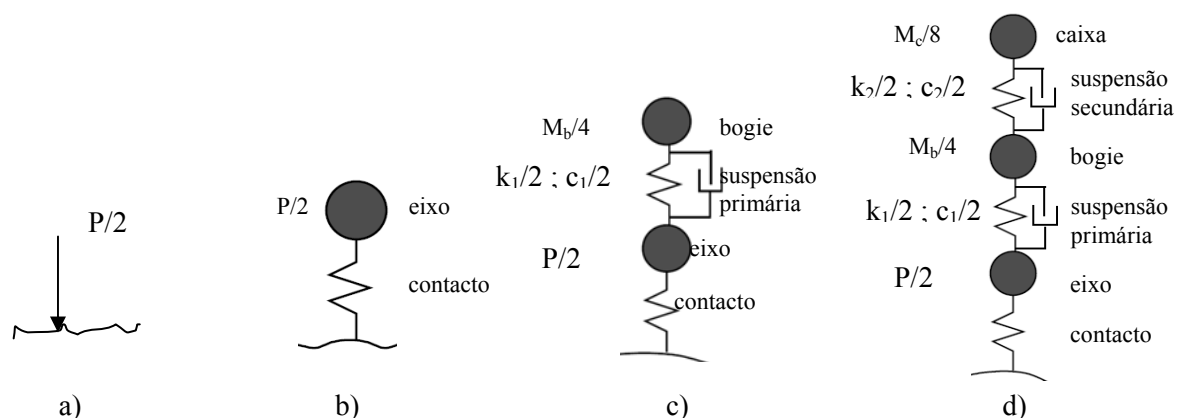


Figura 3. Modelos de eixo de veículo: a) carga móvel; b) 1/2 eixo; c) 1/4 bogie; d) 1/8 veículo.

Para ter em conta os vários eixos do veículo, pode considerar-se uma associação de vários modelos elementares (os anteriormente apresentados) ou considerar-se o modelo de meio bogie ou de meio veículo (Fig. 4).

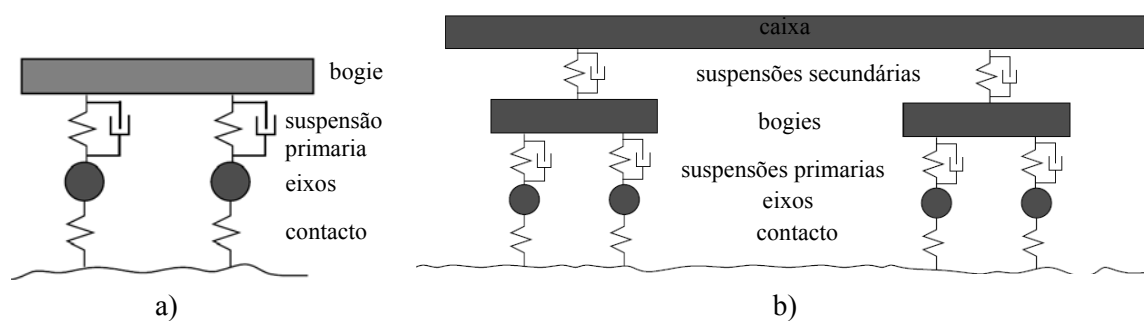


Figura 4. Modelos de veículo: a) 1/2 bogie; b) 1/2 veículo.

De modo a identificar e generalizar o modelo mais adequado para o cálculo dinâmico, na direcção vertical, de uma via ferroviária, realizaram-se cálculos preliminares sobre uma via balastrada e a via em laje, cujos resultados e conclusões se apresentam, de seguida.

Iniciou-se o trabalho, identificando as frequências próprias de cada modelo de veículo, que se indicam no Quadro 3.

Quadro 3. Frequências próprias dos modelos de veículo – ICE3.

<i>Modelo</i>	<i>Frequências próprias (Hz)</i>
1/2 eixo	220,9 (roda)
1/4 bogie	220,9 (roda); 3,82 (bogie)
1/8 veículo	220,9 (roda); 3,9 (bogie); 0,36 (caixa)

De seguida, fez-se passar sobre cada tipo de via um eixo de comboio definido pelos modelos: 1/2 eixo; 1/4 de bogie e 1/8 de veículo. Na Figura 5, apresenta-se o deslocamento da via balastrada, considerando os três modelos de veículo referidos, a circular a uma velocidade de 360 km/h. Os resultados obtidos permitem concluir que o modelo de 1/4 de bogie pode ser considerado para simular a passagem de um eixo sobre a via, por duas razões. A primeira razão deve-se ao facto do modelo de 1/2 eixo, modelo mais simples, não representar a realidade de solicitação (Fig. 5), ao apresentar apenas uma frequência própria cujo valor é próximo do da via em estudo (167 Hz) e ao da frequência de excitação de 360 km/h ( $f = v/d = 153$  Hz, com  $d = 0,65$  m, espaçamento entre travessas). A segunda razão resulta do facto da resposta estrutural obtida com o modelo de 1/4 de bogie ser semelhante à obtida com 1/8 de veículo, modelo mais complexo. Resultados semelhantes foram obtidos no cálculo de via em laje, permitindo concluir que nos cálculos seguintes a utilização do modelo de 1/4 de bogie fornece resultados adequados.

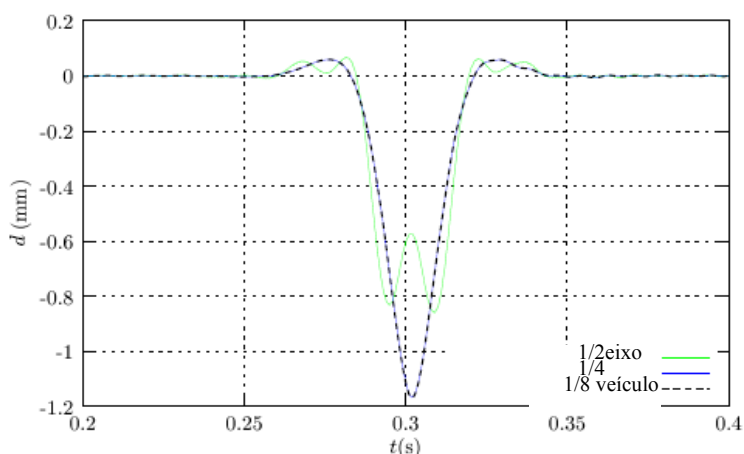


Figura 5. Deslocamento máximo da via, com os três modelos de veículo a circular a 360 km/h.

Verificou-se também que pode considerar-se que cada eixo do veículo é praticamente uma acção independente, como se pode verificar pela Fig. 6, que apresenta o deslocamento de uma via, no caso de um e dois eixos circularem sobre a via. O mesmo tipo de resposta é obtido em termos de deslocamentos aos níveis da travessa, do balastro (em via balastrada), da laje (em via em betão) e da fundação.

### 2.3 Modelo de contacto roda-carril

O contacto entre roda e carril pode ser: perfeito; elástico linear; elástico não linear (Modelo de Hertz). O contacto perfeito entre a roda e o carril não simula a realidade, por isso, não é tido em conta neste estudo. Para considerar o contacto elástico não linear entre roda e carril, mais realista, pode adoptar-se o modelo de Hertz, sendo a força de contacto vertical definida pela Eq. (1).

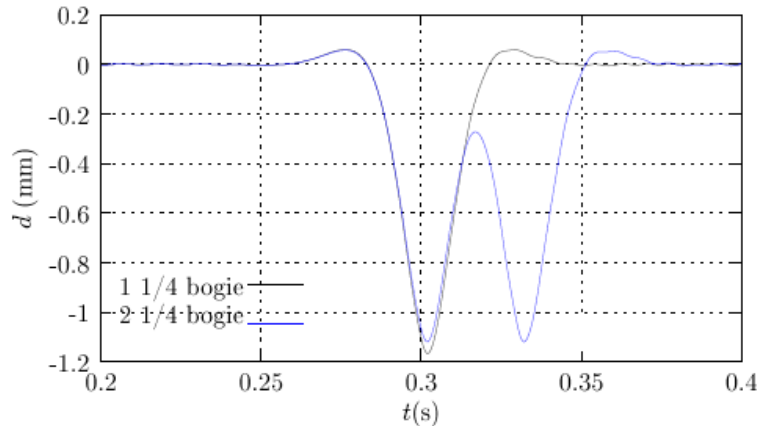


Figura 6. Deslocamento máximo da via, considerando um e dois modelos de 1/4 de bogie a circular a 360 km/h.

No caso de contacto elástico linear, a força de contacto é avaliada pela Eq. (2) e a constante  $k$  pode ser obtida pela linearização da Eq. (1) .

$$f = C_H (x - y - r)^{3/2} \quad (1)$$

$$f = k (x - y - r) \quad (2)$$

$$k = 3/2 C_H (x')^{1/2}, \quad \text{com } x' = x - y - r \quad (3)$$

com:  $f$ , força de contacto;  $x$ , e  $y$ , deslocamentos da roda e do carril;  $r$ , ordenada das irregularidades do carril;  $C_H$ , constante de Hertz.

Para avaliar a influência do tipo de contacto no comportamento dinâmico da via, realizou-se dois cálculos: o primeiro, considerando que o modelo de 1/4 de bogie circula sobre a via à velocidade de 360 km/h com contacto linearizado; o segundo, tendo em conta as mesmas condições de movimento, mas considerando contacto de Hertz. O deslocamento máximo da via, obtido com os dois modelos, está representado na Fig. 7, concluindo-se, portanto, que, em via perfeita, o modelo linearizado de contacto pode ser adoptado. Os resultados obtidos com via com irregularidades são semelhantes.

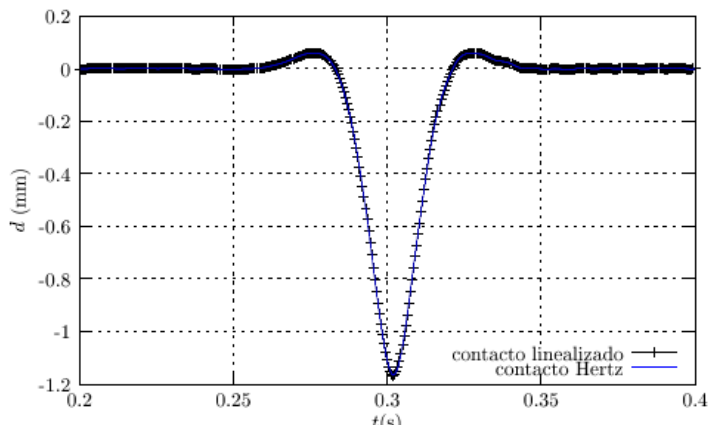


Figura 7. Deslocamento máximo da via com contacto linear e de Hertz: 1/4 de bogie e  $V = 360$  km/h.

## 2.4 Irregularidades distribuídas da via

As irregularidades distribuídas da via ferroviária têm carácter aleatório. Neste trabalho, esses defeitos da via foram definidos considerando:

- irregularidades com comprimento de onda entre 3 e 25 m;

- irregularidades cujo desvio padrão corresponde ao nível de manutenção associado ao limite de alarme para a velocidade de 300 km/h;
- perfil de irregularidade definido a partir da densidade espectral de potência (Eq. 4), com  $\omega_1 = 0,14636$  rad/m e  $\omega_2 = 0,824565$  rad/m.

$$G_{\omega} = \frac{A \omega_2^2 (\omega^2 + \omega_1^2)}{\omega^4 (\omega^2 + \omega_2^2)} \quad (4)$$

No Quadro 4, indica-se a gama do valor limite do desvio padrão referente ao nível de manutenção em situação de limite de alarme para a velocidade de 300 km/h, valores indicados em [3].

Quadro 4. Valores limites, segundo[3].

$V$ (km/h)	$\sigma$ (mm)
300	1,0 – 1,5

O valor de  $A$  da Eq (4) foi ajustado de modo a que a média do desvio padrão dos perfis gerados se situe próximo do valor médio da gama indicada no Quadro 4. No Quadro 5, apresenta-se as características de três perfis de irregularidade.

Quadro 5. Perfis de irregularidades: características.

Perfil	$\sigma$ (mm)	$\sigma_{perfil}$ (mm)	$A$ (rad m)	$\omega_0$ (rad)	$\omega_f$ (rad)
1	1,0 – 1,5	1,1761	$0,45 \times 10^{-6}$	0,25132	2,0943
2		1,2500			
3		1,2812			

Na Figura 8, apresentam-se os 3 perfis de irregularidades gerados a partir do seguinte procedimento:

- 1 - definição das frequências discretas entre  $\omega_0$  e  $\omega_f$ :

$$\Delta_{\omega} = \frac{\omega_f - \omega_0}{N} \quad (5)$$

- 2 – cálculo dos coeficientes  $A_n$ :

$$A_n = \sqrt{\frac{1}{2\pi} G_{\omega}(\omega) \Delta \omega_n} \quad (6)$$

- 3- cálculo dos perfis de irregularidade com  $\phi_n$  aleatórios entre 0 e  $2\pi$ :

$$r(x) = \sqrt{2} \sum_{n=0}^{N-1} A_n \cos(\omega_n x + \phi_n) \quad (7)$$

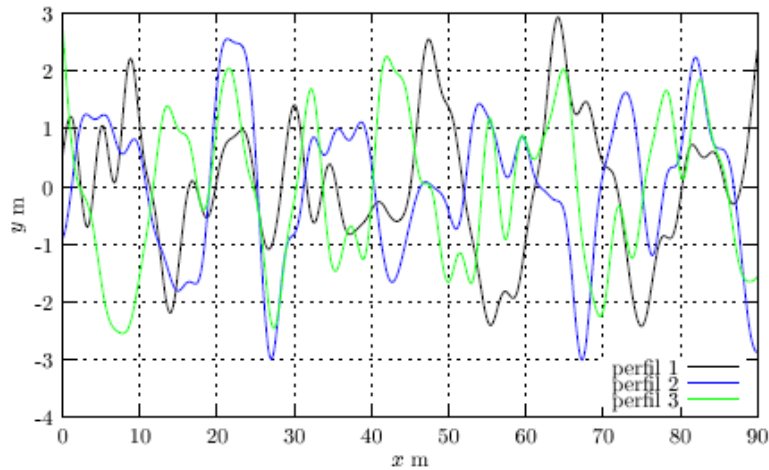


Figura 8. Perfis de irregularidade gerados.

## 2.5 Resultados e discussão

Nesta parte do trabalho, apresenta-se os resultados numéricos obtidos: resposta estrutural da via em situação estática; frequências próprias da via; deslocamentos máximos da via perfeita e da via com irregularidade; força máxima no sistema de fixação em via perfeita e da via com irregularidade.

### 2.5.1. Comportamento estrutural da via em situação estática

No Quadro 6, apresenta-se o deslocamento máximo da via, a força máxima no sistema de fixação carril-travessa e a tensão máxima de flexão na laje, tendo em conta duas posições de aplicação da solicitação: carga sobre travessa e carga entre travessas. A carga é vertical, de magnitude igual a 85000 N, que corresponde a metade da carga por eixo da carruagem do comboio ICE3.

Quadro 6. Resposta estrutural da via Rheda 2000, em condições estáticas ( $k_{est.} = 22,5 \text{ kN/mm}$ ).

Grandeza		Carga sobre apoio	Carga entre apoios
Deslocamento do carril (mm)	no apoio	1,3675	1,2435
	entre apoios	1,2435	1,2435
Força no sistema de fixação (kN)	no apoio	29,7	26,9
Tensão de flexão na laje (kPa)	no apoio	-29,9	-27,1
	entre apoios	11,2	11,6

Analisando os resultados verifica-se que:

- o deslocamento máximo da via insere-se na gama corrente de deslocamentos máximos de vias ferroviárias de alta velocidade: 1,0 – 2,0 mm, para um eixo de 20 t;
- a força no sistema de fixação corresponde a aproximadamente 33% da carga total aplicada.

### 2.5.1. Frequência próprias da via

As frequências próprias da via foram determinadas numericamente, quer por cálculo no domínio do tempo, quer por cálculo no domínio da frequência. Na Figura 9 apresenta-se a receptância directa da via, num dos seus apoios, em função da frequência. Define-se receptância directa como sendo o quociente entre a força aplicada e o deslocamento medido, no mesmo ponto da estrutura. Os picos da



função da receptância correspondem às frequências próprias da via, neste caso, frequências associadas a modos de vibração na direcção vertical.

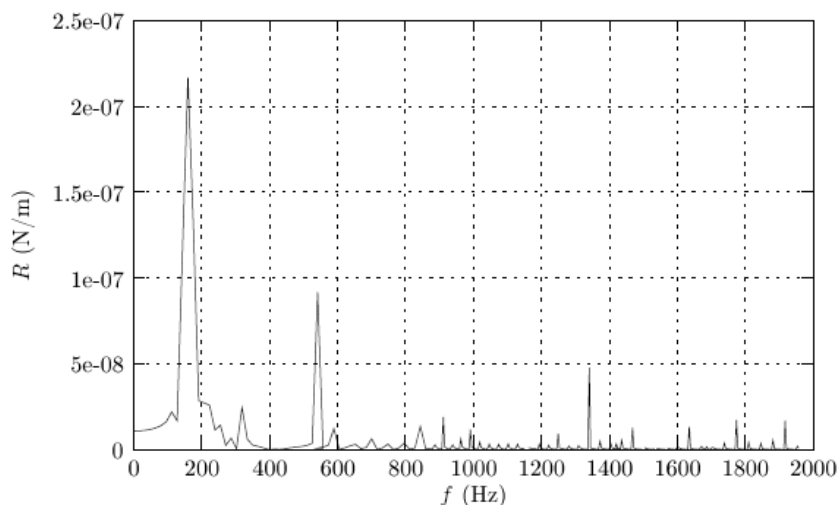


Figura 9. Receptância directa no apoio da via, em função da frequência de excitação.

Analisando a Fig. 9, verifica-se que as frequências próprias da via são: 167, 589 e 1373 Hz. Refere-se que a terceira frequência, 1373 Hz, é a frequência denominada “pin-pin”, correspondente à deformação sinusoidal do carril com comprimento de onda igual ao dobro do espaçamento entre os apoios do carril (Figura 10).



Figura 10. Modo de vibração associado à frequência “pin-pin”.

### 2.5.2. Influência da velocidade de circulação no deslocamento máximo da via

Nesta secção, analisa-se a influência da velocidade de circulação no deslocamento máximo da via perfeita e da via com irregularidade distribuída. No Quadro 7, apresentam-se os resultados obtidos para as velocidades de circulação de: 220, 300 e 360 km/h. Não foram tidas em conta velocidades inferiores a 220 km/h, por estar a analisar-se uma via destinada a alta velocidade.

Quadro 7. Deslocamento máximo da via, em mm, em função da velocidade de circulação.

Velocidade (km/h)	Via perfeita	Via com irregularidade ( $3 \leq \lambda \leq 25$ m)
220	0,9033	0,9305
300	0,9041	0,9384
360	0,9064	0,9556

Analisando os resultados indicados no Quadro 7, verifica-se que:

- o deslocamento máximo em via com irregularidade aleatória de comprimento de onda entre 3 e 25 m é aproximadamente 3 a 5 % superior ao obtido em via perfeita;
- o aumento de velocidade de 220 a 360 km/h induz, em via com irregularidade aleatória, um aumento de aproximadamente 3% do deslocamento máximo da via.

A justificação ao facto dos deslocamentos máximos da via, em caso dinâmico, serem inferiores aos obtidos na situação estática deve-se ao comportamento não linear das palmilhas. Relembre-se que a rigidez destes elementos da via, em condições estáticas, é de 22,5 kN/mm, sendo mais elevada em condições dinâmicas ( $k = 40$  kN/mm).

### 2.5.3. Influência da velocidade de circulação na força do sistema de fixação carril-travessa

No Quadro 8, apresenta-se o valor da força no sistema de fixação carril-travessa, obtida para as velocidades de circulação referidas no ponto anterior.

Quadro 8. Força no sistema de fixação carril-travessa, em kN, em função da velocidade de circulação.

<i>Velocidade (km/h)</i>	<i>Via perfeita</i>	<i>Via com irregularidade (<math>3 \leq \lambda \leq 25</math> m)</i>
220	34,1	34,2
300	34,2	34,3
360	34,3	34,4

Analisando os resultados indicados no Quadro 8, verifica-se que:

- o aumento de velocidade, de 220 a 360 km/h, parece ser irrelevante no valor da força no sistema de fixação carril-travessa;
- a força do sistema de fixação é aproximadamente 40% da carga por eixo considerada;
- o nível de irregularidade distribuída considerado no estudo não influencia significativamente a magnitude da força no sistema de fixação carril-travessa.

### 3. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo numérico permitem retirar algumas conclusões, ainda preliminares, sobre o comportamento de uma via em laje para alta velocidade – via tipo Rheda 2000, que se resumem:

- o deslocamento máximo estático da via insere-se na gama corrente de deslocamentos máximos de vias ferroviárias de alta velocidade e a força no sistema de fixação, em situação estática, corresponde a aproximadamente 33% da carga total aplicada;
- o deslocamento máximo em via com irregularidade aleatória de comprimento de onda entre 3 e 25 m é aproximadamente 3 a 5% superior ao obtido em via perfeita;
- o aumento de velocidade de 220 a 360 km/h induz, em via com irregularidade aleatória, um aumento de aproximadamente 3% do deslocamento máximo da via e parece ser pouco significativo no aumento da força no sistema de fixação carril-travessa, quer em via perfeita, quer em via com irregularidade.

Para melhor compreender o comportamento de vias ferroviárias em laje é necessário ainda realizar cálculos numéricos adicionais que tenham em conta outros tipos de irregularidades da via (com diferentes comprimentos de onda, defeitos pontuais, etc.) e irregularidades das rodas dos comboios.

### 4. AGRADECIMENTOS

Este artigo apresenta parte da investigação realizada com os apoios financeiros da “FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia” – Ref. SFRH/BD/25020/2005 e da Universidad Politécnica de Madrid - Ref. PT-2006-024-19CCPM.

### REFERÊNCIAS

- [1] UIC – Feasibility study “ballastless track”: UIC, 2002.
- [2] Esveld, C. – Modern Railway Track. Second Edition, MRT Productions, 2001.
- [3] CEN –pr EN 13848-5 Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 5: Geometric quality assessment, European Committee for Standardization, 2005.