



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Análise Dinâmica de Pontes Ferroviárias para Trens de Alta Velocidade

Pollyana Gil Cunha Amaral¹, Carlos Eduardo Nigro Mazzilli²

¹ Universidade de São Paulo / Escola Politécnica / pollyanagca@gmail.com

^{2,3} Universidade de São Paulo / Escola Politécnica / cenmazzi@usp.br

Resumo

Este trabalho utiliza uma metodologia simplificada de análise dinâmica para o estudo das vibrações em pontes ferroviárias, produzidas pela passagem de um trem de alta velocidade, associadas à presença de irregularidades nos trilhos. Iniciou-se o estudo a partir de um modelo do veículo composto por quinze graus de liberdade, referentes aos deslocamentos verticais e horizontais transversais e rotações em torno dos eixos longitudinal, transversal e vertical. Os modelos dinâmicos do trem e da ponte foram tratados de forma desacoplada, sendo conectados pelas forças de interação trem-ponte. Desta forma, foram calculados os carregamentos provenientes da modelação dinâmica do trem, adotando-se inicialmente a hipótese de tabuleiro rígido e indeslocável e ainda, considerando-se a presença de irregularidades geométricas nos trilhos no plano vertical. Neste trabalho, foi considerado um estudo de caso utilizando-se o modelo veicular Alfa Pendular. As forças de interação obtidas da modelação do veículo foram aplicadas em um modelo estrutural de alta hierarquia da ponte, dividido em elementos finitos de casca, sendo que em cada nó da ponte foram especificados os esforços obtidos da análise dinâmica do veículo. Para representar a passagem do comboio sobre a ponte, foram utilizadas funções que descrevem as forças de interação trem-ponte em cada nó do modelo unifilar da ponte, em cada intervalo de tempo, até que todo o trem tenha percorrido o comprimento da ponte. A consideração de tabuleiro rígido indeslocável é corrigida por meio de um processo iterativo, de forma que se somem os deslocamentos do tabuleiro obtidos para a primeira determinação dos esforços de interação à excitação de suporte aplicada nas rodas do trem para simular a presença das irregularidades. Com isso, é possível identificar a resposta dinâmica proveniente das irregularidades geométricas nos trilhos, avaliando o conforto dos passageiros no interior do vagão.

Palavras-chave

Análise Dinâmica; Pontes Ferroviárias; Irregularidades Geométricas; Trens de Alta Velocidade.

Introdução

Este trabalho refere-se ao estudo das vibrações em pontes ferroviárias de trens de alta velocidade, produzidas pela passagem da composição de um trem de passageiros de modelo Alfa Pendular. Para isto, será apresentada uma metodologia simplificada para a análise dinâmica, considerando o veículo e a ponte desacoplados, de forma a facilitar a análise de interação de esforços e ainda, podendo utilizar ferramentas computacionais correntes e disponíveis no mercado para análise estrutural pelo método dos elementos finitos.

Para simulação da carga dinâmica produzida pelos vagões de uma composição, são considerados os graus de liberdade de deslocamentos vertical (*bounce*) e transversal



horizontal (*bounce*) e rotações em torno dos eixos longitudinal (*roll*), transversal (*pitch*) e vertical (*yaw*), tanto para o vagão, quanto para os dois truques, totalizando quinze graus liberdade.

É analisada a influência das irregularidades geométricas nos trilhos no plano vertical sobre a interação dinâmica trem-trilhos, que poderão potencialmente excitar os modos de vibração do veículo e da ponte.

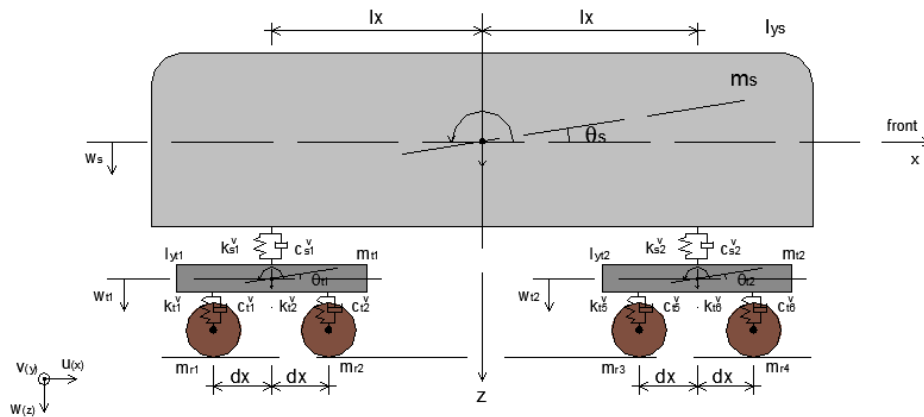
Nesta metodologia, os modelos dinâmicos do trem e da ponte são tratados de forma desacoplada, sendo conectados pelas forças de interação trem-ponte. Desta forma, são calculados os carregamentos provenientes da modelação dinâmica do trem, adotando-se inicialmente a hipótese de tabuleiro rígido e indeslocável e, ainda, considerando-se a presença de irregularidades geométricas nos trilhos no plano vertical. As forças de interação obtidas da modelação do veículo são aplicadas em um modelo estrutural de alta hierarquia da ponte utilizando-se em elementos finitos de casca. Para representar a passagem do comboio sobre a ponte, são utilizadas funções que descrevem as forças de interação trem-ponte em cada nó do modelo da ponte, em cada intervalo de tempo, até que todo o trem tenha percorrido o comprimento da ponte. Com isso, é possível identificar a resposta dinâmica proveniente das irregularidades geométricas e, ainda, avaliar a amplificação dinâmica obtida para cada esforço. Por fim, é avaliada a influência na resposta dinâmica devida à adoção da hipótese de pavimento rígido e indeslocável, fazendo-se a correção dos deslocamentos impostos na interface trilho-roda, no plano vertical, por meio de um procedimento iterativo, de forma que se somem os deslocamentos do tabuleiro obtidos para a primeira determinação dos esforços de interação (com pavimento indeslocável) à excitação de suporte aplicada nas rodas do trem para simular a presença das irregularidades. Com isso, pode-se obter os novos esforços de interação, que são reaplicados ao modelo de elementos finitos do tabuleiro para determinar os novos deslocamentos, repetindo-se o procedimento até que os resultados sejam muito próximos aos do passo anterior.

Assim, considerando os efeitos das irregularidades nos trilhos, será analisado o conforto dos passageiros no interior dos vagões, sendo comparados aos limites estabelecidos pelo Eurocode EN1991-2.

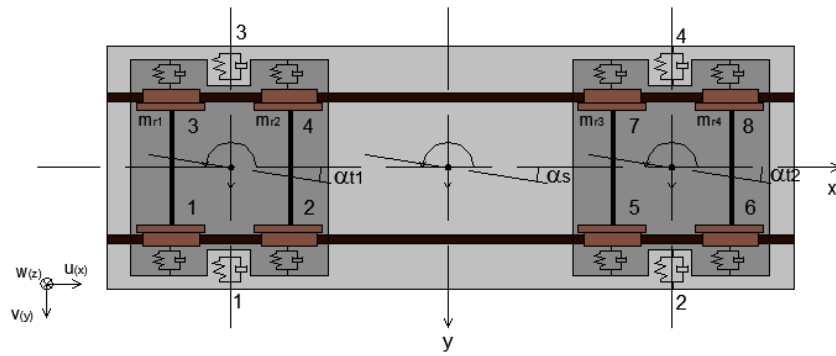
Os modelos do veículo e da ponte, assim como a interação dinâmica trem-trilhos, são estudados com a utilização do software de modelagem estrutural e análise dinâmica Adina – *Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis*, disponibilizado no Laboratório de Mecânica Computacional da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Modelagem

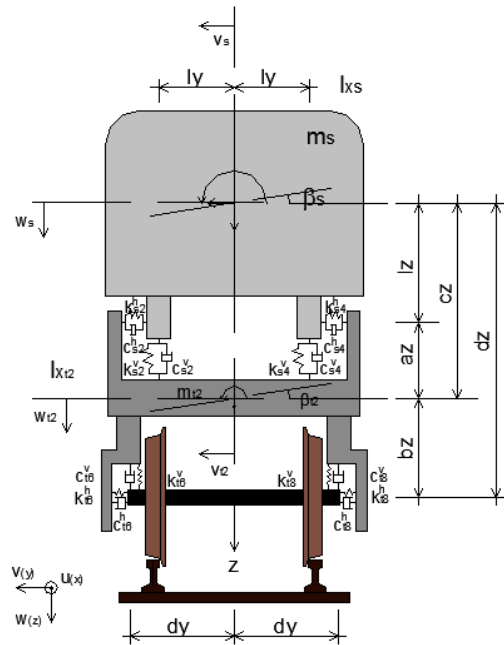
Para a modelagem veicular, considerou-se o modelo de trem Alfa Pendular devido à disponibilidade de informações sobre a geometria e parâmetros mecânicos deste veículo. Os dados utilizados foram extraídos de Magalhães (2013) e são apresentados na Figura 1 e na Tabela 1.



Seção longitudinal



Planta



Seção transversal

Figura 1 – Modelo dinâmico do veículo



Tabela 1 – Propriedades mecânicas do trem

Corpo do carro	m_s (kg)	32.901
	I_{xs} (kg.m ²)	78.000
	I_{ys} (kg.m ²)	2.083.600
	I_{zs} (kg.m ²)	2.600.000
Suspensão secundária	k_{sv} (N/m)	1.320.000
	k_{sh} (N/m)	815.000
	c_{sv} (N.s/m)	26.900
	c_{sh} (N.s/m)	36.000
Truques	m_{t1} (kg)	4.932
	I_{xt1} (kg.m ²)	2.100
	I_{yt1} (kg.m ²)	5.150
	I_{zt1} (kg.m ²)	4.800
	m_{t2} (kg)	4.823
	I_{xt2} (kg.m ²)	2.100
	I_{yt2} (kg.m ²)	5.150
	I_{zt2} (kg.m ²)	4.800
Suspensão primária	k_{tv} (N/m)	3.420.000
	k_{th} (N/m)	5.000.000
	c_{tv} (N.s/m)	36.000
	c_{th} (N.s/m)	100

O modelo foi realizado considerando elementos de barras tridimensionais discretizadas do tipo *beam* (na terminologia do Adina) e elementos rígidos (*rigid link*) para garantir o comportamento de corpo rígido entre as barras de uma mesma estrutura, vagão ou truque. As molas e os amortecedores foram representados por elementos de barra do tipo *spring*, aos quais é possível atribuir propriedades de rigidez e amortecimento. Na Figura 2 é apresentado o modelo veicular.

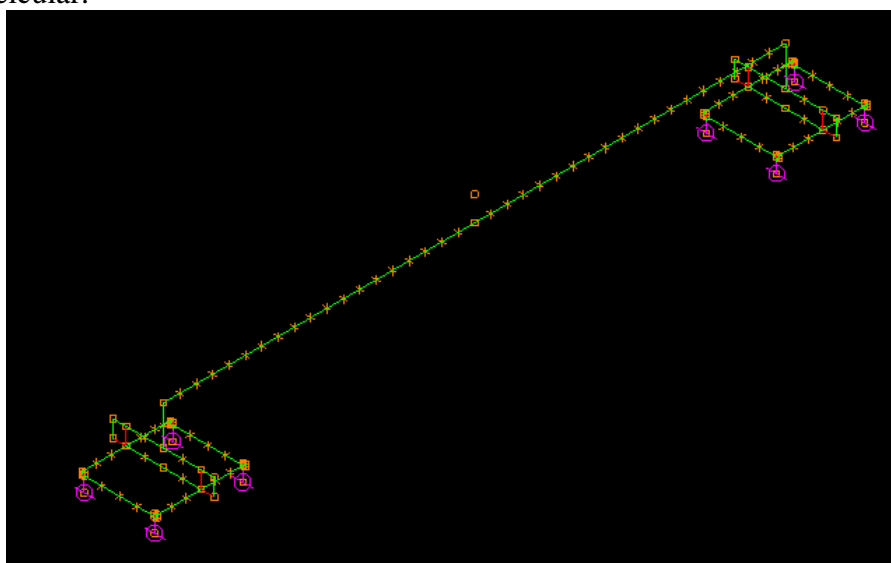


Figura 2 – Modelo do trem

Uma preocupação relevante é a perda de contato entre o trem e a estrutura, podendo ocorrer devido à presença de irregularidades nos trilhos. Esta perda de contato pode ocasionar um descarrilamento do trem, além de poder gerar forças de interação consideráveis para a estrutura.

Para a representação deste contato, será utilizado o modelo disponível no Adina que, neste caso, será um contato do tipo nó a nó. O contato será considerado em cada roda do trem, onde serão aplicadas as irregularidades existentes nos trilhos. A Figura 3 apresenta os parâmetros utilizados no Adina para caracterização do elemento de contato.

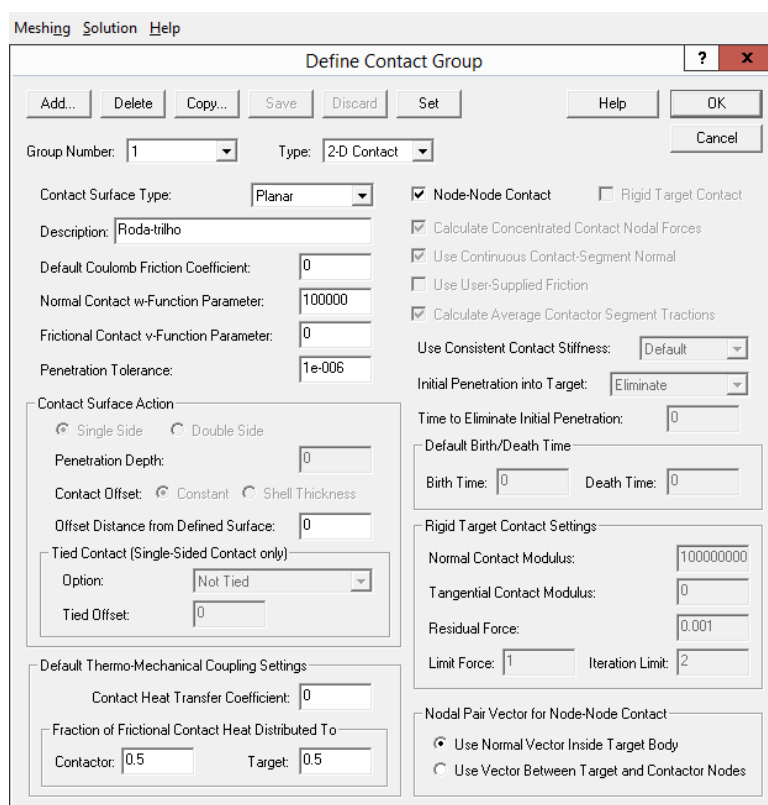


Figura 3 – Parâmetro do elemento de contato

Para o modelo da estrutura, considerou-se o projeto de Atravessamento do Rio Sado em Portugal, entre a Estação Pinheiro e o km 94 da Linha do Sul, sendo utilizado como estudo de caso um dos vãos do Viaduto de Acesso. Neste projeto, os viadutos são caracterizados por um tabuleiro misto aço-concreto, com seção de viga dupla metálica e laje de concreto armado. Os viadutos são compostos por tabuleiros contínuos com vãos de 37,5m e 45m, sendo que neste caso, modelou-se apenas um vão de 45m. Para simular a continuidade entre os vãos, adotaram-se restrições de momentos fletores nos planos horizontal e vertical nos apoios do viaduto, bem como as restrições aos deslocamentos. A Figura 4 ilustra a seção transversal da ponte.

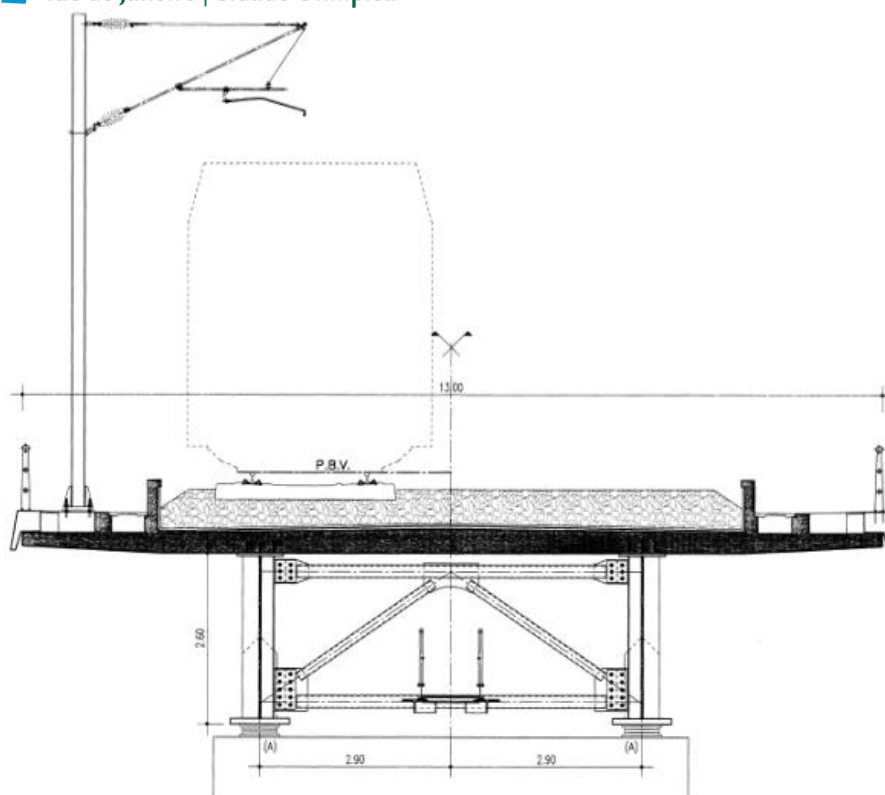


Figura 4 – Seção transversal do viaduto

O modelo estrutural do viaduto foi realizado no Adina mediante a utilização de elementos de casca, considerando o eixo da geometria dos elementos estruturais do viaduto. A Figura 5 apresenta o modelo da estrutural do viaduto.

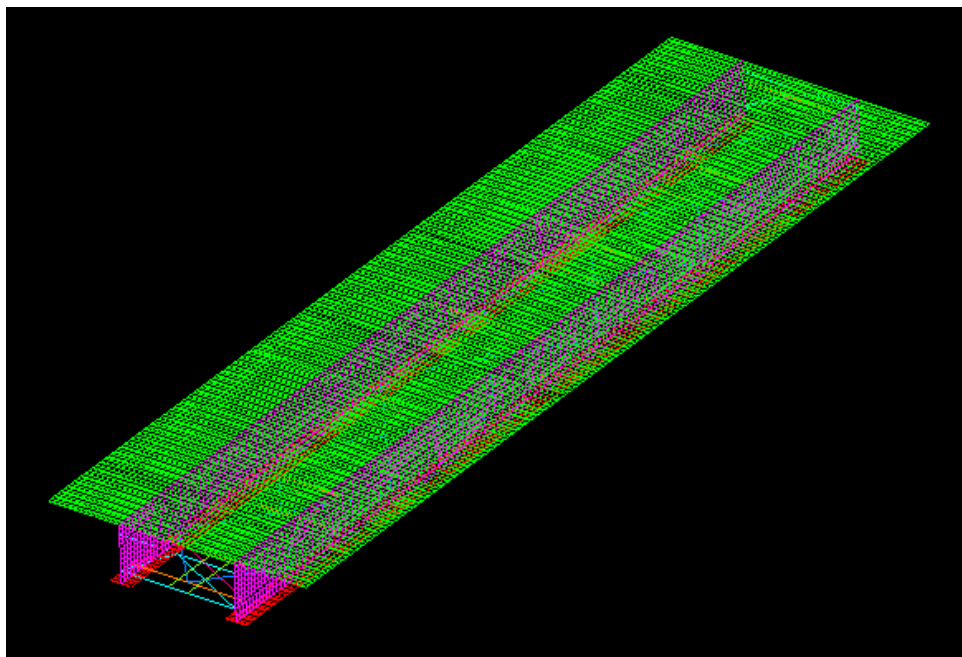


Figura 5 – Modelo estrutural do viaduto



Como dado de entrada da análise dinâmica, considerou-se um espectro padronizado utilizado para definir o perfil de irregularidades nos trilhos de forma estocástica. Partiu-se de uma densidade espectral de potência $S(\omega)$ que define as irregularidades aleatórias nos trilhos, obtida a partir de expressões existentes na literatura ajustadas em função de medições experimentais. Assim, a relação entre a densidade espectral de potência e o espectro de amplitude $A(\omega)$ de cada componente de frequência é dada por:

$$S(\omega) = \frac{A^2(\omega)}{\Delta\omega} \quad (1)$$

onde $\Delta\omega$ é a resolução em frequência.

Como a função $S(\omega)$ foi construída a partir de valores discretos de frequências ω , é natural que tanto $S(\omega)$ quanto $A(\omega)$ também sejam dados em valores discretos. Desta forma, considerando os valores da amplitude de oscilação para cada frequência, a série espacial de irregularidade pode ser dada por:

$$r(x) = \sum_{i=1}^N A(\omega_i) \cos(\omega_i x + \phi_i) \quad (2)$$

Observa-se que ϕ_i é uma fase aleatória uniformemente distribuída entre 0 e 2π . Desta forma, é possível gerar uma infinidade de séries espaciais que possuam a mesma densidade espectral de potência.

Conforme comentado, a série espacial da irregularidade será aplicada no modelo veicular em forma de deslocamentos impostos, para cada roda do trem, e com isso, serão extraídos os históricos das forças de interação vertical em função do tempo. Essas forças serão aplicadas num modelo de alta hierarquia da ponte, de modo a simular o tráfego do trem sobre a ponte.

Como o foco de análise deste trabalho será o estado limite de conforto dos passageiros, a variável de saída de interesse será a aceleração máxima ($Y_{\text{máx}}$) percebida pelo passageiro no interior de um vagão do trem. Observa-se que, para este estudo de caso, considerou-se que o veículo trafega numa velocidade de 200km/h.

Conclusões

Analisando-se primeiramente os modos de vibração encontrados para os modelos do viaduto e do trem, observa-se que não há proximidade entre os modos de flexão no plano vertical do viaduto (1° modo) e de deslocamento vertical do trem (2° modo), que seriam os modos condicionantes para o conforto dos passageiros no interior do vagão, distantes, portanto, de um caso de ressonância entre o trem e o viaduto.

Tabela 2 – Modos de vibração

Modo	Trem	Viaduto
1°	0,361	0,992
2°	0,707	1,153
3°	0,895	1,374
4°	1,625	1,669
5°	2,197	1,676
6°	5,344	1,686
7°	5,350	1,713
8°	6,891	1,913
9°	6,894	1,952
10°	7,081	1,960

Com relação à correção do pavimento rígido e indeslocável, foram necessárias apenas três iterações para que as forças de interação estejam muito próximas às forças obtidas na iteração anterior, como pode-se perceber na Figura 6.

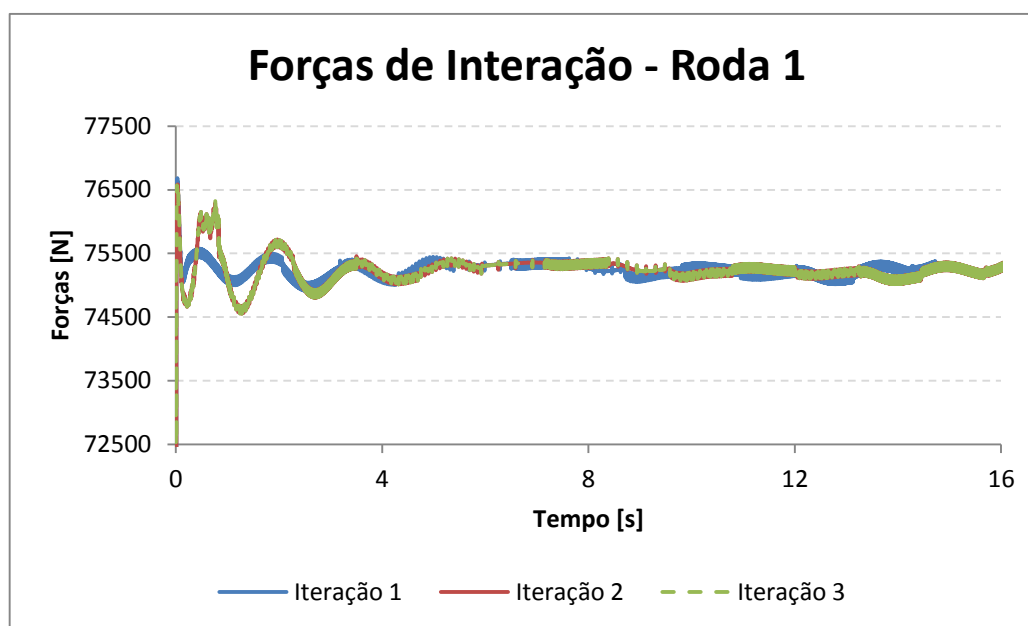


Figura 6 – Forças de interação em uma roda

As acelerações encontradas no interior dos vagões apresentam um máximo de $0,15\text{m/s}^2$, apresentando, portanto, um nível de conforto muito bom aos passageiros, conforme especificações do Eurocode.

Tabela 3 – Valores máximos admissíveis da aceleração vertical no interior do vagão

Nível de conforto	Aceleração vertical (m/s^2)
Muito bom	1,0
Bom	1,3
Aceitável	2,0

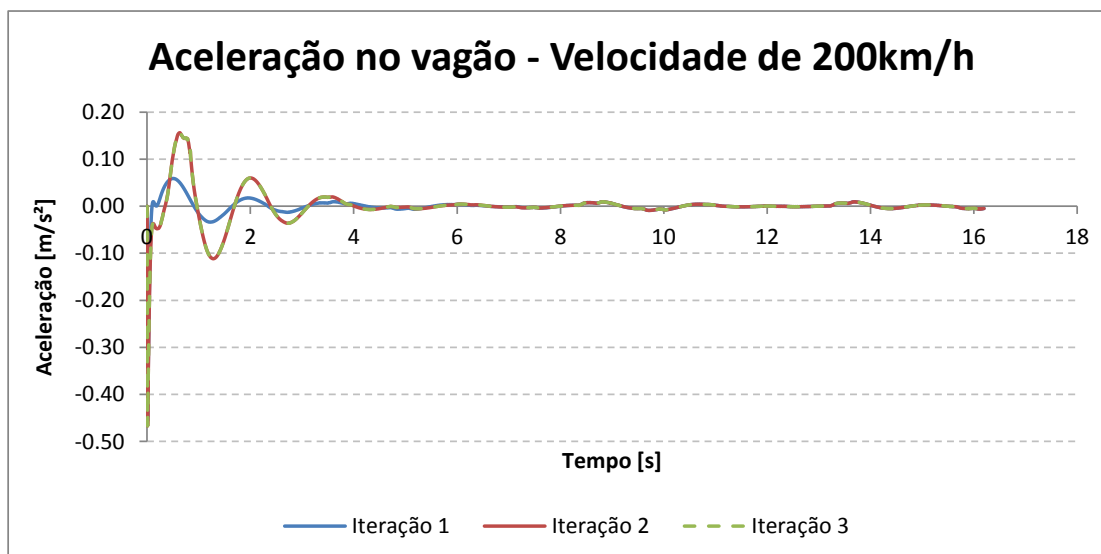


Figura 7 – Acelerações no interior do vagão

Referências

- CLOUGH, R. W. and Penzien, J., Dynamics on Structures, Third Edition, 1995.
- CUNHA, P. G., Análise Dinâmica de Pontes Ferroviárias: uma Metodologia Simplificada, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2011.
- DELGADO, R. and CALÇADA, R., Dynamic Effects Induced by High Speed Traffic on Rail Bridges, International Journal of Railway Technology, Volume 1, Issue 1, Pages 87-104, 2012.
- EUROPEAN STANDRAD, EN 1991-2, Actions of Structures – Part 2: Traffic Loads on Bridges, 2003.
- EUROPEAN STANDARD, EN 1990-Annex A2, Annex A2: Application for Bridges (Normative), 2005.
- FIGUEIREDO, H., CALÇADA, R. e DELGADO, R., Soluções estruturais para pontes ferroviárias em linhas de alta velocidade, Texto de suporte à disciplina Dinâmica de Estruturas em Vias Férreas de Alta Velocidade do Programa Doutoral em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Portugal, 2009.
- FIGUEIREDO, H., CALÇADA, R. e DELGADO, R., Aspectos regulamentares no cálculo de pontes ferroviárias de linhas de alta velocidade, Texto de suporte à disciplina Dinâmica de Estruturas em Vias Férreas de Alta Velocidade do Programa Doutoral em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Portugal, 2009.
- FRÝBA, L., Dynamics of Railway Bridges, 1996.
- MAGALHÃES, H. M. P., Development of advanced computational models of railway vehicles, Thesis to obtain the Master of Science Degree in Mechanical Engineering, Portugal, 2009.
- RIBEIRO, D. R. F., Comportamento dinâmico de pontes sob acção de tráfego ferroviário a alta velocidade. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Portugal, 2004.