

II Encontro de Ferrovias, 2010 – Vitória – ES

Metodologia para avaliar a interação entre trem e ponte

Rodolfo Alvarado Montoya^{1*}, Remo Magalhães de Souza²

¹ Vale, Av. Dante Michelini, 5500, Vitória - Espírito Santo - CEP: 29090-900, Brasil

² UFPA, Av. Augusto Correa, nº 01, Belém - Pará - CEP: 66075-900, Brasil

e-mail: rodolfo.montoya@vale.com, remo@ufpa.br

Resumo Na análise dinâmica de pontes ferroviárias existem vários fatores que são importantes para a correta simulação do comportamento da estrutura. Em uma visão muito simples, pode-se observar que as pontes ferroviárias são estruturas solicitadas por um veículo com massa muito grande, o que provoca mudanças consideráveis no comportamento da estrutura. Este artigo apresenta uma metodologia numérica para a análise estrutural dinâmica de pontes ferroviárias, considerando a interação entre a ponte e o trem ferroviário. Como conclusão, observou-se a forte influência da velocidade de passagem dos veículos na resposta dinâmica da estrutura, em especial nas amplitudes dos deslocamentos encontrados. Em função da elevada complexidade do sistema, observou-se também a necessidade de aprofundar as pesquisas nesta área. Com isto, será possível utilizar ferramentas que permitam projetar e analisar estruturas de forma mais realista, levando a soluções mais seguras e econômicas.

Palavras-Chaves: pontes ferroviárias, análise dinâmica, interação veículo estrutura.

1. INTRODUÇÃO

As pontes e viadutos são estruturas complexas solicitadas por cargas móveis que induzem efeitos dinâmicos na estrutura [1]. Aspectos importantes, tais como tipo e velocidade do veículo, defeitos na via, frequências naturais, modos de vibração e taxas de amortecimento da estrutura são de muita importância, e devem ser considerados no projeto de uma ponte. Isto ocorre já que devido à presença de um carregamento dinâmico, pode ocorrer o fenômeno de ressonância, e com o acúmulo de dano por fadiga, pode ocorrer o colapso parcial ou total da estrutura.

A qualidade dos resultados obtidos por métodos numéricos para a análise de estruturas depende da capacidade de reprodução das características fundamentais do fenômeno que estes métodos tentam simular. Idealmente, estes métodos devem apresentar a maior precisão possível com o menor custo computacional.

Para a análise considerando interação entre o veículo e a ponte é muito importante considerar a influência de cada parâmetro no comportamento da estrutura. A figura 1 permitir uma comparação visual entre as dimensões de um veículo ferroviário com uma ponte.

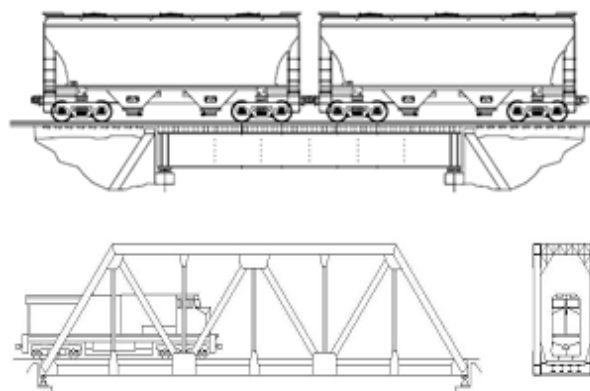


Fig. 1 Veículo ferroviário trafegando em ponte [2]

Por tanto, existe a necessidade de desenvolver uma metodologia para a análise de pontes ferroviárias de forma mais precisa, que garanta a simulação do comportamento

dinâmico do sistema, levando em conta a interação entre o trem e a ponte de forma mais realista.

2. OBJETIVO

O objetivo geral deste artigo consiste na apresentação de uma formulação geral que foi utilizada para o desenvolvimento de um programa de computação para análise dinâmica considerando a interação entre trem e ponte.

3. JUSTIFICATIVA

O avanço do conhecimento sobre o comportamento das pontes ferroviárias é muito importante para a mineração no Brasil, contribuindo assim para a segurança, viabilidade econômica do projeto e com o meio ambiente. Com isto, será possível projetar e construir estruturas utilizando menor quantidade de material. Desta forma, no caso de uma estrutura de concreto, pode-se diminuir a quantidade de emissão de CO₂. Além disso, esta análise é indispensável no cálculo de pontes ferroviárias com veículos de alta velocidade, já que a velocidade é um parâmetro de grande influência nos fatores de amplificação dinâmica. Na figura 2, mostra-se respostas (acelerações) referentes a veículos trafegando a diferentes velocidades sobre uma ponte.

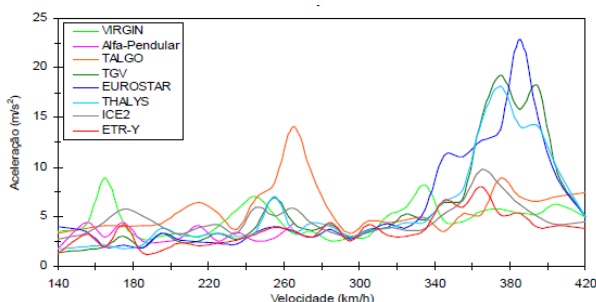


Fig. 2 Aumento das acelerações em função da velocidade [4]

Deve-se destacar que o presente trabalho foi desenvolvido como uma dissertação de mestrado que foi concebida como uma das atividades de um convênio de cooperação entre a Vale e o Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicado a Engenharia (NICAE) da Universidade Federal do Pará (UFPA). O projeto de pesquisas foi iniciado em junho de 2007, e o seu objetivo é o de desenvolver metodologia de avaliação da integridade das

pontes e viadutos ferroviários da Estrada de Ferro Carajás (EFC).

4. MODELO NUMÉRICO DA PONTE

Os modelos da ponte são definidos com o método dos elementos finitos, utilizando o elemento clássico de barra com seis graus de liberdade.

A equação 1 permite a determinação dos deslocamentos de um ponto (x) qualquer no interior do elemento a partir dos deslocamentos dos nós.

$$\mathbf{U}(x) = \mathbf{N}(x)\mathbf{d} \quad (1)$$

onde .

$$\mathbf{N}(x) = \begin{bmatrix} 1 - \frac{x}{L} & 0 & 0 & \frac{x}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2x^3}{L^3} - \frac{3x^2}{L^2} + 1 & x - \frac{2x^2}{L} + \frac{x^3}{L^2} & 0 & \frac{3x^2}{L^2} - \frac{2x^3}{L^3} & \frac{x^3}{L^2} - \frac{x^2}{L} \end{bmatrix} \quad (2)$$

é denominada matriz de função de forma de elemento.

A partir das derivadas da matriz $\mathbf{N}(x)$, pode-se definir também uma matriz $\mathbf{B}(x)$ que relaciona as deformações generalizadas da seção com os deslocamentos nodais do elemento, como mostra a equação 3.

$$\mathbf{B}(x) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12x}{L^3} - \frac{6}{L^2} & -\frac{4}{L} + \frac{6x}{L^2} & 0 & \frac{6}{L^2} - \frac{12x}{L^3} & \frac{6x}{L^3} - \frac{2}{L} \end{bmatrix} \quad (3)$$

As equações de movimento de um sistema de múltiplos graus de liberdade podem ser estabelecidas a partir do equilíbrio direto das forças associadas a cada grau de liberdade, ou através do Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV), obtendo assim,

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{d}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{d}} + \mathbf{k}\mathbf{d} = \mathbf{p}_t \quad (4)$$

de modo que

$$\mathbf{m} = \int_0^L \mathbf{N}(x)^T \mathbf{m}(x) \mathbf{N}(x) dx, \quad \mathbf{c} = \int_0^L \mathbf{N}(x)^T \mathbf{c}(x) \mathbf{N}(x) dx \quad (5)$$

$$\mathbf{k} = \int_0^L \mathbf{B}(x)^T \mathbf{K}_s \mathbf{B}(x) dx, \quad \mathbf{p}_t = \int_0^L \mathbf{N}(x)^T \mathbf{q}(x) dx + \mathbf{p}$$

onde \mathbf{m} é a matriz de massa consistente, \mathbf{c} é a matriz de amortecimento, \mathbf{k} é a matriz de rigidez e \mathbf{p}_t o vetor de forças nodais do elemento (incluindo as forças nodais equivalentes às cargas distribuídas); $m(x)$ e $c(x)$ são as massas e amortecimento por unidade de comprimento; \mathbf{K}_s é a matriz de

rigidez da seção e $\mathbf{q}(x)$ é o vetor contendo as cargas distribuídas na direção x e y . Após a obtenção das matrizes de massa, amortecimento e rigidez de cada elemento, monta-se as matrizes da estrutura e resolve-se o problema.

5. MODELO NUMÉRICO DOS VEÍCULOS

Os modelos do veículo podem ser obtidos a partir das equações de Lagrange, que correspondem às equações de “equilíbrio dinâmico”, porém em termos de energia. Em um sistema conservativo, para o qual se deve cumprir que todas as forças que atuam são deduzíveis a partir de uma função potencial, obtêm,

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial(T-V)}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial(T-V)}{\partial q_j} = 0 \quad (6)$$

onde, T é a energia cinética e V é a energia potencial do sistema; q_j representam as coordenadas generalizadas do sistema.

Denominando-se lagrangeano $\mathcal{L} = T - V$ à diferença da energia cinética, menos a energia potencial, a equação (6) pode ser reescrita na forma seguinte, conhecida como Equação de Euler-Lagrange.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_j} = 0 \quad (7)$$

Como o sistema em questão possui elementos submetidos a forças dissipativas proporcionais a determinadas velocidades, é possível acrescentar uma parcela à equação 7 utilizando uma função dissipativa R . Assim,

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_j} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_j} = 0 \quad (8)$$

onde,

$$R = \frac{1}{2} c v^2 \quad (9)$$

é denominada função de dissipação de Rayleigh [5], a qual depende da velocidade e representa a dissipação do sistema. Para um sistema simples composto de mola, massa e amortecedor têm-se que a energia cinética, energia potencial e a função de dissipação [7] são, respectivamente.

$$T = \frac{1}{2} m \dot{x}^2, \quad V = \frac{1}{2} k x^2, \quad R = \frac{1}{2} c \dot{x}^2 \quad (10)$$

onde, m é a massa, k é a rigidez e c é o amortecimento do sistema. Há situações em que o movimento ocorre em torno de um eixo, de tal modo que a massa pode produzir uma resistência à rotação e estará associada a uma energia cinética rotacional.

Pode-se definir a energia cinética rotacional da massa a partir do momento de inércia rotacional de massa J_v e a velocidade angular ω [7], como,

$$J_v = m_v r^2, \quad \omega = \theta r, \quad T = \frac{1}{2} J_v \dot{\theta}^2 \quad (11)$$

onde θ é o ângulo de rotação e r é o raio em relação ao eixo de rotação.

Neste artigo, se apresentam dois modelos de veículo, quais sejam, os modelos simplificado e completo. No modelo de veículo simplificado mostrado na figura 3, considera-se a massa suspensa da caixa, a rigidez e o amortecimento do sistema de suspensão.

Também é modelada a massa m_r das rodas que estão em contato com a estrutura, sendo acopladas à estrutura.

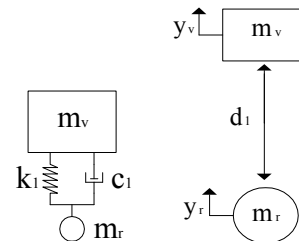


Fig. 3 Modelo de interação simplificado e graus de liberdade [3]

A Figura 3 ilustra os dois graus de liberdade deste modelo de veículo e o deslocamento generalizado (deslocamento relativo) entre as duas massas.

Utiliza-se a equação de Lagrange mostrada na equação 8, para se obter as matrizes do veículo. Neste modelo, tem-se 2 graus de liberdade, e, portanto, existem 2 equações de Lagrange. O deslocamento generalizado pode ser determinado como

$$d_1 = (y_v - y_r) \quad (12)$$

onde, y_v é o deslocamento vertical do centro da gravidade do veículo, y_r é o deslocamento vertical da roda, d_1 é o deslocamento generalizado. As equações de Lagrange que determinam o equilíbrio do sistema para este veículo são,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{y}_v} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial y_v} + \frac{\partial R}{\partial \dot{y}_v} &= 0 \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{y}_r} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial y_r} + \frac{\partial R}{\partial \dot{y}_r} &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

A energia cinética produzida pela massa do veículo suspensa, a energia potencial produzida pela deformação da mola e a função de dissipação do veículo são,

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} m_v \dot{y}_v^2 + \frac{1}{2} m_r \dot{y}_r^2 \\ V &= \frac{1}{2} k_1 (y_v - y_r)^2 \\ R &= \frac{1}{2} c_1 (\dot{y}_v - \dot{y}_r)^2 \end{aligned} \quad (14)$$

A energia total do veículo sem considerar a dissipação é mostrada na equação 15.

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} m_v \dot{y}_v^2 + \frac{1}{2} m_r \dot{y}_r^2 - \frac{1}{2} k_1 (y_v - y_r)^2 \quad (15)$$

Desenvolvendo por partes cada uma das equações de Lagrange da equação 13 se obtém,

$$\begin{aligned} m_v \ddot{y}_v + c_1 (\dot{y}_v - \dot{y}_r) + k_1 (y_v - y_r) &= 0 \\ m_r \ddot{y}_r - c_1 (\dot{y}_v - \dot{y}_r) - k_1 (y_v - y_r) &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Escrevendo esta equação na forma matricial, obtêm-se as seguintes matrizes de massa, amortecimento e rigidez.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{vv} &= [m_v], \quad \mathbf{M}_{rr} = [m_r] \\ \mathbf{C}_{vv} &= [c_1], \quad \mathbf{C}_{vr} = \mathbf{C}_{rv} = [-c_1], \quad \mathbf{C}_{rr} = [c_1] \\ \mathbf{K}_{vv} &= [k_1], \quad \mathbf{K}_{vr} = \mathbf{K}_{rv} = [-k_1], \quad \mathbf{K}_{rr} = [k_1] \end{aligned} \quad (17)$$

onde, m_v, m_r são a massa da caixa e da roda do veículo respectivamente, c_1 é constante do amortecimento viscoso do veículo, k_1 é a rigidez da suspensão do veículo.

Em modelos com interação completa, a ação vertical é representada por elementos que simulam a suspensão primária, secundária e em alguns casos, a inércia rotacional do veículo.

As forças que atuam sobre o sistema são impostas pela interação entre o veículo e estrutura, assumindo-se que as forças são aplicadas sobre a estrutura de modo concentrado.

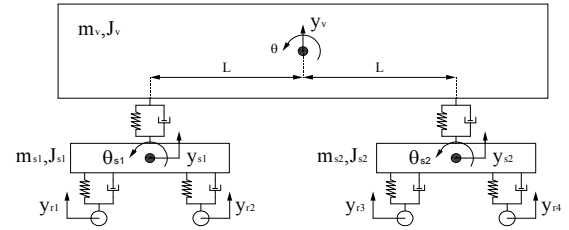


Fig. 4 Modelo de interação completa

De uma forma resumida se apresentam as matrizes dos veículos completo. O modelo numérico do veículo completo é apresentado na figura 4 e na figura 5.

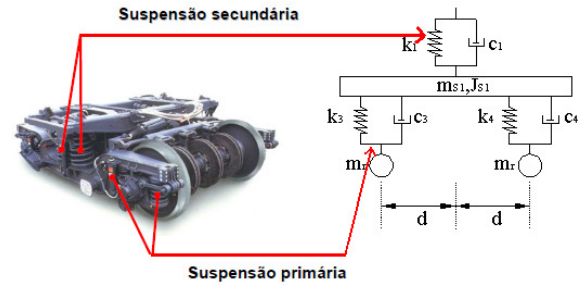


Fig. 5 Relação entre truque e modelo completo [4] As matrizes de massa do veículo referente ao modelo completo são:

$$\mathbf{M}_w = \begin{bmatrix} m_v & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{s2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_r = \begin{bmatrix} m_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_r \end{bmatrix} \quad (18)$$

As matrizes de amortecimento dos veículos são semelhantes,

$$\mathbf{C}_w = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_1 L + c_2 L & -c_1 & 0 & -c_2 & 0 \\ -c_1 L + c_2 L & c_1 L^2 + c_2 L^2 & c_1 L & 0 & -c_2 L & 0 \\ -c_1 & c_1 L & c_1 + c_3 + c_4 & -c_3 d + c_4 d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3 d + c_4 d & c_3 d^2 + c_4 d^2 & 0 & 0 \\ -c_2 & -c_2 L & 0 & 0 & c_2 + c_3 + c_6 & -c_3 d + c_6 d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_3 d + c_6 d & c_3 d^2 + c_6 d^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{C}_w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_3 & -c_4 & 0 & 0 \\ d c_3 & -d c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_5 & -c_6 \\ 0 & 0 & d c_5 & -d c_6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_v = \mathbf{C}_w^T, \quad \mathbf{C}_v = \begin{bmatrix} c_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_6 \end{bmatrix}$$

As matrizes de rigidez são análogas às matrizes de amortecimento, devendo-se substituir os coeficientes de amortecimento pelos coeficientes de rigidez.

6. SOLUÇÃO NUMÉRICA DA INTERAÇÃO

O modelo empregado para a integração do sistema completo, considerando todos os

graus de liberdade, é baseado em um elemento de viga de Bernoulli, acoplado a um sistema correspondente ao eixo do veículo, tal como é mostrado na figura 6 para um veículo com interação simplificada [6].

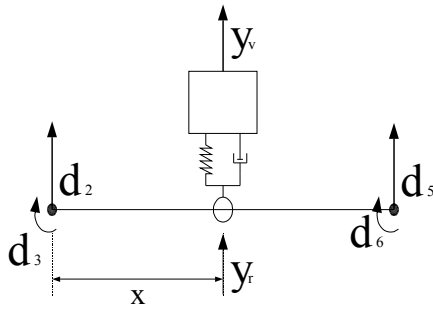


Fig. 6 Elemento de Bernoulli com interação

Denotam-se d_i os graus de liberdade dos nós do elemento de viga, y_v , y_r os graus de liberdade correspondentes à massa suspensa e à roda do veículo, respectivamente. Na equação 21 se descreve de um modo mais compacto a equação geral dos veículos com interação.

$$\mathbf{M}_v \begin{bmatrix} \ddot{y}_v \\ \ddot{y}_r \end{bmatrix} + \mathbf{C}_v \begin{bmatrix} \dot{y}_v \\ \dot{y}_r \end{bmatrix} + \mathbf{K}_v \begin{bmatrix} y_v \\ y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{gv} \\ \mathbf{F}_{gr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{F}(t) \end{bmatrix} \quad (21)$$

onde, \mathbf{M}_v é a matriz de massa do veículo, \mathbf{C}_v é a matriz de amortecimento do veículo, \mathbf{K}_v é a matriz de rigidez do veículo.

As matrizes deverão ser associadas às correspondentes matrizes do elemento de viga de Bernoulli, para obter as matrizes do elemento de viga com interação, sendo que isto deverá ser considerado para cada localização da roda de cada veículo na ponte. As matrizes dos elementos devem ser recalculadas em cada passo de tempo, dependendo se há ou não solicitação sobre o elemento, para qualquer tipo de veículo.

Nesta análise utilizam-se somente os deslocamentos verticais e as rotações do elemento de viga, adicionando-se os graus de liberdade do veículo.

Os deslocamentos y_r de cada roda são os que interagem com a estrutura e para determiná-los, usa-se uma função de interpolação, que dependerá da localização da roda sobre o elemento, de modo que

$$y_r = \mathbf{N}\mathbf{d}, \quad y_r = \begin{bmatrix} N_{22} & N_{23} & N_{25} & N_{26} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_2 \\ d_3 \\ d_5 \\ d_6 \end{bmatrix} \quad (22)$$

onde,

$$\begin{aligned} N_{22} &= \frac{2x^3}{L^3} - \frac{3x^2}{L^2} + 1, & N_{23} &= x - \frac{2x^2}{L} + \frac{x^3}{L^2} \\ N_{25} &= \frac{3x^2}{L^2} - \frac{2x^3}{L^3}, & N_{26} &= \frac{x^3}{L^2} - \frac{x^2}{L} \end{aligned} \quad (23)$$

são comumente utilizadas para interpolação de deslocamentos em elementos de viga, e representarão a forma deformada dos elementos, com os deslocamentos \mathbf{d} sendo indicados na figura 6.

Para realizar a interação em todo o sistema, utiliza-se uma matriz de transformação \mathbf{T} , tal que.

$$\begin{Bmatrix} y_v \\ y_r \end{Bmatrix} = \mathbf{T}\mathbf{D} \quad (24)$$

onde, \mathbf{D} são os deslocamentos do sistema completo (considerando os graus de liberdade da ponte e das massas suspensas) e

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1 \\ \mathbf{T}_2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

sendo $\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2$ sub-matrizes, de tal forma que \mathbf{T}_1 é uma matriz diagonal identidade e tem tantas linhas quanto o número de graus de liberdade das massas suspensas, \mathbf{T}_2 tem tantas linhas quanto o número de rodas do veículo. O número de colunas das duas submatrizes é igual ao número de graus de liberdade da estrutura, mais o número de graus de liberdade das massas suspensas. Para realizar a interação do veículo com a estrutura, as matrizes de massa, de amortecimento e de rigidez dos veículos e o vetor de forças que atuam sobre a estrutura deverão ser transformados para que estas possam ser somadas às respectivas matrizes dos elementos de viga Bernoulli, da seguinte maneira

$$\mathbf{M}_{\text{Interação}} = \mathbf{M} + \mathbf{T}^T \mathbf{M}_v \mathbf{T}, \quad \mathbf{C}_{\text{Interação}} = \mathbf{C} + \mathbf{T}^T \mathbf{C}_v \mathbf{T}, \quad (26)$$

$$\mathbf{K}_{\text{Interação}} = \mathbf{K} + \mathbf{T}^T \mathbf{K}_v \mathbf{T}, \quad \mathbf{F}(t) = \mathbf{T}^T \mathbf{P}(t)$$

onde, \mathbf{M} é a matriz de massa expandida da estrutura, \mathbf{C} é a matriz de amortecimento

expandida da estrutura, \mathbf{K} é a matriz de rigidez expandida da estrutura, $\mathbf{F}(t)$ é o vetor de forças de interação transformadas. $\mathbf{M}_{\text{Interação}}$, $\mathbf{C}_{\text{Interação}}$ e $\mathbf{K}_{\text{Interação}}$ são respectivamente as matrizes de massa, amortecimento e rigidez do sistema com interação.

As matrizes $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ antes de serem somadas na equação 26 devem ser expandidas, adicionando-se linhas e colunas nulas referentes aos graus de liberdade das massas suspensas dos veículos, de modo que estas matrizes possuam ordem igual ao do vetor \mathbf{D} considerado na equação 24.

Usando a matriz de interpolação \mathbf{T}_2 , podem-se aproximar os deslocamentos das rodas e as forças que atuam sobre a estrutura:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_r(t) &= \mathbf{T}_2(x)\mathbf{D}(t), & \mathbf{P}(t) &= -\mathbf{T}_2^T(x)\mathbf{F}(t) \\ \dot{\mathbf{y}}_r(t) &= \mathbf{T}_2(x)\dot{\mathbf{D}}(t), & \ddot{\mathbf{y}}_r(t) &= \mathbf{T}_2(x)\ddot{\mathbf{D}}(t) \end{aligned} \quad (27)$$

onde, $\mathbf{D}(t)$ são os deslocamentos da estrutura e das massas suspensas, para cada instante de tempo, $\mathbf{F}(t)$ são as forças de interação entre veículo e estrutura.

Pode-se expressar o equilíbrio da ponte mediante a equação 28.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{D}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{D}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{D}(t) = -\mathbf{T}_2^T(x)\mathbf{F}(t) \quad (28)$$

Desenvolvendo as equações 21, 27 e 28 e agrupando em forma de matriz, obtém-se finalmente a seguinte equação.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} + \mathbf{T}_2(x)^T \mathbf{M}_r \mathbf{T}_2(x) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{D}} \\ \dot{\mathbf{D}}_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} + \mathbf{T}_2(x)^T \mathbf{C}_r \mathbf{T}_2(x) & \mathbf{T}_2(x)^T \mathbf{C}_v \\ \mathbf{T}_2(x) \mathbf{C}_r & \mathbf{C}_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{D}_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} + \mathbf{T}_2(x)^T \mathbf{K}_r \mathbf{T}_2(x) & \mathbf{T}_2(x)^T \mathbf{K}_v \\ \mathbf{T}_2(x) \mathbf{K}_r & \mathbf{K}_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{D}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_2(x)^T \mathbf{F}_{gr} \\ \mathbf{F}_{gw} \end{bmatrix} \quad (29)$$

que serve para acoplar o veículo no elemento da viga.

7. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Como aplicação se estudará uma treliça e observará como os deslocamentos centrais aumentam quando se altera a velocidade de passagem do veículo. Caso a ponte esteja sujeita a danos por fadiga, quando se aumenta ou se diminui a velocidade referente a cada passagem do veículo, o dano correspondente pode aumentar ou diminuir. Para esta análise, escolheu-se a ponte Suaçuí, localizado na linha 1, no KM 342+517 – Ramal Tronco da

Estrada de Ferro Vitória Minas. Esta estrutura tem um comprimento total de 41,00m sendo uma treliça tipo Warren. O tipo de veículo adotado corresponde ao modelo simplificado, e a estrutura é mostrada na figura 7.

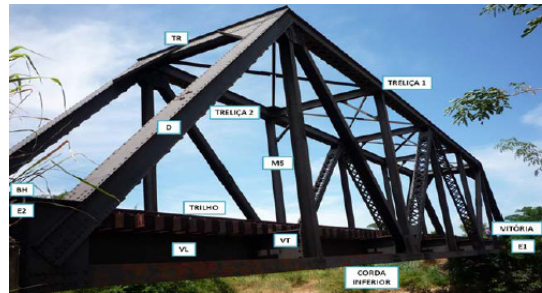


Fig. 7 Ponte sobre o rio Suaçuí [8]

A composição veicular é composta por 3 Locomotivas + 167 vagões + 1 locomotiva + 83 vagões. O peso por eixo das locomotivas é de 27 toneladas e dos vagões é de 22 toneladas na configuração carregada..

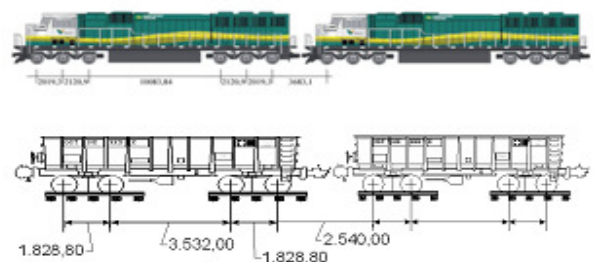


Fig. 8 Veículos ferroviários

Para velocidades muito baixas os deslocamentos não são amplificados, podendo-se dizer que a estrutura esta sendo solicitada com uma carga quase estática, como se mostra na figura 9.

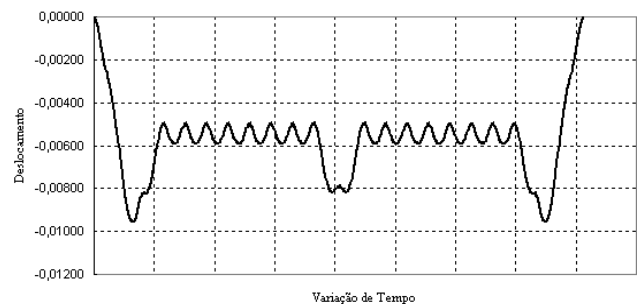


Fig. 9 Deslocamentos no centro do vão com veículo a 10 km/h

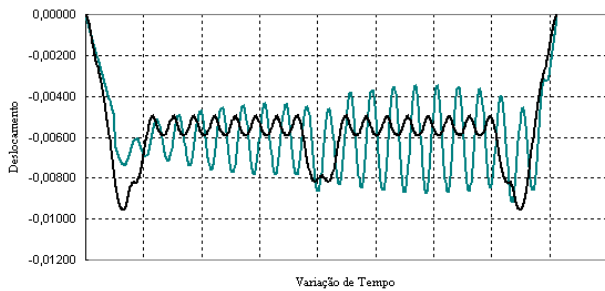


Fig. 10 Deslocamentos no centro do vão com veículo a 50 km/h

Observa-se na figura 10, que para uma velocidade de 50 km/h os deslocamentos chegam a alguns pontos a serem 1,33 vezes maior, do que os deslocamentos correspondentes à velocidade de 10km/h.

Observa-se na figura 11, que para uma velocidade de 190 km/hr, os deslocamentos chegam até valores 3 vezes maior do que os deslocamentos correspondentes à velocidade de 10km/h.

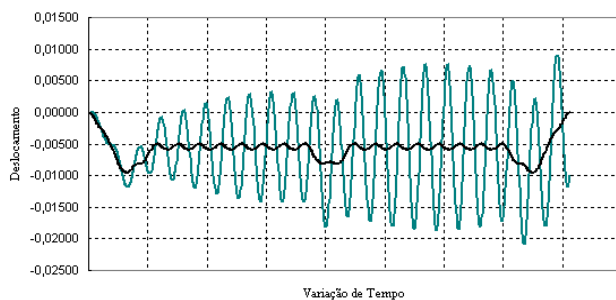


Fig. 11 Deslocamentos no centro do vão com veículo a 190 km/hr

8. CONCLUSÕES

Observou-se que os deslocamentos que ocorrem na estrutura são fortemente influenciados pela velocidade de passagem do veículo.

Durante a pesquisa, observou-se também que a rigidez e os amortecedores dos truques são importantes para dissipar energia e diminuir as amplificações dos deslocamentos na estrutura.

O estudo das vibrações e as amplificações deste tipo de estrutura são de muita importância para a engenharia. Portanto, é preciso estudá-los com maior precisão, de modo a permitir a obtenção de resultados mais reais.

9. REFERÊNCIAS

[1] SAMPAIO, R.C., MAGALHÃES DE SOUZA; Desenvolvimento de metodologia

para avaliação da integridade estrutural de pontes e viadutos ferroviários ao longo da Estrada de Ferro Carajás. Convenio UFPA-Vale, 2007.

[2] AREMA; Bridge Inspection Handbook. The American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, 2008.

[3] MONTOYA, R.C.; Desenvolvimento de programa computacional para a análise de pontes ferroviários considerando interação veículo estrutura. Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Pará. Brasil, 2009.

[4] CALÇADA, R.; Aspectos críticos da infra-estrutura ferroviária de alta velocidade. Ciclo de Formação Avançada na Ferrovia, 2008.

[5] BARBOSA, R.S.; Aplicação de sistemas multicorpos na dinâmica de veículos guiados. Tese Doutorado Universidade São Paulo. Brasil, 1999.

[6] GABALDÓN, F.R.; Análisis dinámico de estructuras sometidas a acciones de trenes de alta velocidad, considerando la interacción vehículo-estructura. Informe técnico-Universidad politécnica de Madrid. España, 2005.

[7] GERE, J.; Mecânica de Materiais. Livro editorial Thomson, 2006.

[8] BITTENCOURT, T. N.; Monitoração da ponte do Rio Suaçuí-Relatório Final (LEM-VALE 02-10 FUSP 1892), 2010.