

Modelagem estocástica do comportamento dinâmico de tabuleiros rodoviários submetidos ao tráfego de veículos

Ricardo Santos de Almeida¹ e José Guilherme Santos da Silva²

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
Faculdade de Engenharia (FEN)

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGE CIV)
Rua São Francisco Xavier, N° 524, 5° Andar, Bloco A, Sala 5002
CEP: 20550-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Tel.: 55 21 2569-3359; e-mail: ricardosalmeida@gmail.com

² Departamento de Engenharia Mecânica (MECAN)
Rua São Francisco Xavier, N° 524, 5° Andar, Bloco A, Sala 5016-A
CEP: 20550-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Tel.: 55 21 2587-7537; Fax: 55 21 2587-7537; e-mail: jgss@uerj.br

Resumen

Neste trabalho propõe-se uma metodologia, desenvolvida no domínio do tempo, de acordo com um modelo estatístico, para análise da resposta dinâmica do tabuleiro de pontes rodoviárias devido à travessia de comboios de diversos tipos de veículos sobre o pavimento irregular dessas obras-de-arte. O modelo matemático é concebido de forma a considerar o conjunto de veículos e o tabuleiro como um único sistema: sistema veículo-viga. Simula-se o tabuleiro por elementos finitos unilineares, massas discretizadas nos nós e flexibilidade distribuída ao longo destes elementos. São considerados quatro modelos para representar os veículos do comboio, com um, dois ou três eixos, todos constituídos por conjuntos de massas, molas e amortecedores. As irregularidades da pista são definidas por um modelo matemático não-determinístico, com base na densidade espectral do perfil do pavimento. O carregamento sobre a superestrutura é constituído por uma sucessão infinita de veículos, igualmente espaçados e deslocando-se com velocidade constante. São estudadas as respostas dos modelos estruturais, com base em tabuleiros de concreto armado, com e sem balanços, em seção do tipo caixão, nas seções onde ocorrem os efeitos máximos. As conclusões deste trabalho versam sobre a adequação da metodologia de análise desenvolvida e do modelo matemático empregado, observando-se a influência do tipo de veículo sobre a resposta dinâmica dos tabuleiros rodoviários analisados, bem como, a magnitude dos efeitos provenientes da interação das viaturas com as irregularidades superficiais e suas conseqüências sobre as atitudes correntes de projeto.

A STOCHASTIC MODELLING OF THE DYNAMICAL BEHAVIOUR OF HIGHWAY BRIDGE DECKS UNDER TRAFFIC LOADS

Summary

In this paper an analysis methodology is developed to evaluate the dynamic response on highway bridge decks due to vehicles crossing on the rough pavement surfaces. The analysis methodology follows a statistical model running in the time domain. The mathematical model simulates the bridge structure and the vehicle series as a system, the vehicle-bridge system. The bridge deck follows a straight beam model made discrete by finite elements and nodal concentrated masses, with vertical translations and in-plane rotations as degrees of freedom. The vehicle simulation uses concentrated parameters of mass, stiffness and damping. Four different types of vehicles are modelled as rigid masses connected by springs and dampers with one, two, four or five degrees of freedom. According to each vehicle model, translational and rotational displacements are considered. The deck surface roughness is defined by a weakly stationary, second order and ergodic random process based on a well-known power spectrum density of road pavement profiles. The moving load is modelled by an infinite series of equal vehicles, regularly spaced, and running at constant velocity. Only steady-state response is considered. Response data are produced on reinforced concrete highway bridge decks made of a straight box girder cross section based on several spans and support arrangements. Conclusions are concerned with the fitness of the developed analysis methodology and the mathematical model adequacy. The influence of the vehicle type on the highway bridge decks dynamic behaviour was observed. The magnitude of the effects due to the interaction of the vehicles with an irregular pavement surface and their consequences about design and maintenance are investigated.

INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento de pontes rodoviárias submetidas a cargas dinâmicas é, atualmente, um tema bastante explorado por diversos pesquisadores em universidades e institutos de pesquisa em todo o mundo, como, por exemplo, Almeida & Silva^{1,2}, Silva^{3,4}, Fryba & Pirner⁵, Wang et al.⁶ e Sedlacek & Drosner⁷. O interesse por este assunto advém da importância de se conhecer de forma mais realista a resposta destas obras-de-arte quando submetidas às suas condições normais de uso.

Na prática corrente de projeto, as conseqüências destas cargas dinâmicas têm sido geralmente consideradas através de um coeficiente de impacto que é determinado, na maioria dos regulamentos, inclusive o brasileiro^{8,9}, exclusivamente com base no vão da estrutura, sendo aplicado às condições estáticas de projeto.

Contudo, tem-se observado que algumas pontes podem atingir um nível de vibração, sob condições de tráfego corrente, que as tornam inaceitáveis por comprometerem as condições de serviço e a durabilidade da obra. A observação dos tabuleiros das pontes rodoviárias em serviço revela, com frequência, situações de usura prematura dos pavimentos, das estruturas de concreto e dos aparelhos de apoio, o que pode ser uma indicação de critérios de projeto pouco conservativos.

Para se conhecer de forma mais precisa as tensões e as deformações existentes nos elementos estruturais constituintes das obras-de-arte rodoviárias, é fundamental que os modelos matemáticos empregados simulem a estrutura tanto mais próximo da realidade quanto possível. Neste caso, faz-se necessário, também, uma boa representação das ações dinâmicas existentes sobre o tabuleiro, associadas aos comboios de veículos e, ainda, modelar as irregularidades superficiais de forma adequada.

Com este objetivo, nesta investigação fazem-se o desenvolvimento e a implementação de uma metodologia de análise, a partir de estudos anteriores, Ferreira¹⁰ e Silva^{3,4}, objetivando avaliar as ações dinâmicas que ocorrem nas obras-de-arte devido à travessia de comboios de diversos tipos de veículos, com base na consideração do efeito proveniente da interação entre as viaturas e as irregularidades superficiais definidas segundo modelo não-determinístico.

Esta metodologia de análise é desenvolvida no domínio do tempo de acordo com um modelo estatístico. O modelo matemático é concebido de forma a simular o conjunto de veículos e o tabuleiro como um único sistema, denominado neste trabalho de sistema veículo-ponte. O tabuleiro das obras-de-arte é discretizado com base no emprego de elementos finitos de viga unidimensionais, utilizando-se massas concentradas e flexibilidade distribuída.

As irregularidades da pista são definidas por um modelo matemático não-determinístico, com base na densidade espectral do perfil do pavimento, obtida experimentalmente. São considerados quatro modelos distintos para representar os veículos do comboio na análise paramétrica, com um, dois ou três eixos, todos simulados por sistemas de massas, molas e amortecedores e descritos por graus de liberdade à translação e rotação no plano. O carregamento sobre a superestrutura das pontes é constituído por uma sucessão infinita de veículos, igualmente espaçados e deslocando-se com velocidade constante sobre o tabuleiro.

Observa-se a resposta do modelo matemático desenvolvido, com base em pontes rodoviárias de concreto armado, com seção tipo caixão e inércia constante, em termos dos espectros de resposta correspondentes aos valores dos fatores de amplificação máximos médios dos deslocamentos e esforços nas seções onde ocorrem os efeitos máximos.

Conclui-se sobre a adequação do modelo matemático acerca de aspectos quantitativos e qualitativos referentes à metodologia de análise desenvolvida e, também, no que tange aos efeitos dinâmicos oriundos das irregularidades superficiais no tabuleiro sobre o comportamento de pontes rodoviárias submetidas à passagem de veículos.

MODELO MATEMÁTICO

A seguir, é apresentado o modelo matemático desenvolvido e implementado, referente ao tabuleiro das pontes rodoviárias, aos veículos responsáveis pelo carregamento da estrutura e às irregularidades do pavimento. Em seguida, com base nos modelos obtidos, desenvolve-se o modelo do sistema veículo-ponte, que agrega todos estes elementos em um único sistema, o qual será objeto de uma análise paramétrica com vistas a se determinar o comportamento da superestrutura da obra-de-arte submetida ao tráfego de comboios de veículos.

Tabuleiro rodoviário

O tabuleiro das pontes é modelado utilizando-se elementos finitos de viga, de acordo com a teoria do Método dos Elementos Finitos¹¹ (MEF). Cada elemento finito que participa da discretização da ponte possui, portanto, dois graus de liberdade por nó (graus de liberdade associados à translação vertical e a rotação no próprio plano).

A massa do tabuleiro é concentrada nos nós dos elementos finitos. A metodologia de concentração da massa consiste em que cada nó receba metade da massa correspondente ao elemento finito que converge ao mesmo. Os nós restritos, ou seja, localizados nos pontos de apoio da estrutura, não recebem massa. Todos os apoios da estrutura são modelados como sendo rígidos. A seção transversal é do tipo caixão e seu momento de inércia em relação à linha neutra pode variar ao longo do comprimento do tabuleiro. A Figura 1 apresenta o modelo de uma ponte biapoiada discretizada por n elementos finitos de viga, com $n-1$ massas concentradas.

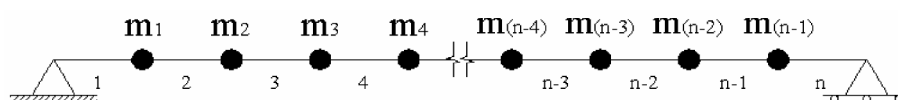


Figura 1. Modelo de uma ponte biapoiada com sua massa discretizada nos nós

Modelos dos veículos

Os modelos matemáticos dos veículos desenvolvidos neste trabalho procuram representar veículos reais que trafegam sobre as pontes e os viadutos rodoviários existentes. Estes modelos são considerados discretos, bidimensionais e constituídos por conjuntos de massas, molas e amortecedores. Para esta investigação são concebidos quatros modelos de veículos distintos, desde um mais simples, com apenas um grau de liberdade, até um mais complexo, com cinco graus de liberdade. Cada um destes modelos é definido e analisado separadamente a seguir, explicitando-se sua equação de movimento.

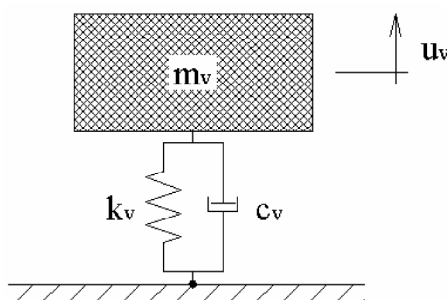


Figura 2. Modelo de veículo I (Silva⁴)

Modelo de Veículo I: este modelo é formado por um sistema massa-mola-amortecedor, com apenas uma massa e um eixo, conforme apresentado na Figura 2. Este veículo apresenta

um grau de liberdade, sendo este o movimento vertical de sua massa, descrito pela coordenada u_v . Apesar de sua simplicidade, com este modelo já é possível modelar a rigidez e o amortecimento da suspensão e dos pneus do veículo, além do mesmo já incorporar a força de inércia devida à massa da viatura. Aplicando-se o princípio de D'Alembert, obtém-se a equação diferencial que descreve o movimento deste modelo de veículo, sendo esta:

$$m_v \ddot{u}_v + c_v \dot{u}_v + k_v u_v = 0 \quad (1)$$

Modelo de Veículo II: este modelo é constituído por um conjunto de massas, molas e amortecedores, sendo, mais especificamente, por uma massa suspensa, m_s , que representa o chassi e a carroceria do veículo, uma massa não-suspensa, m_{ns} , que representa os pneus, rodas e eixos, um conjunto mola-amortecedor, k_{vs} e c_{vs} , que representa, respectivamente, a rigidez e o amortecimento da suspensão, e um segundo conjunto mola-amortecedor, k_{vp} e c_{vp} , que representa, respectivamente, a rigidez e o amortecimento dos pneus do veículo. Este modelo de veículo, apresentado na Figura 3, também possui apenas um eixo, porém, já apresenta dois graus de liberdade, sendo estes, o movimento vertical da massa suspensa, descrito pela coordenada u_v , e o também movimento vertical da massa não-suspensa, descrito pela coordenada u_1 .

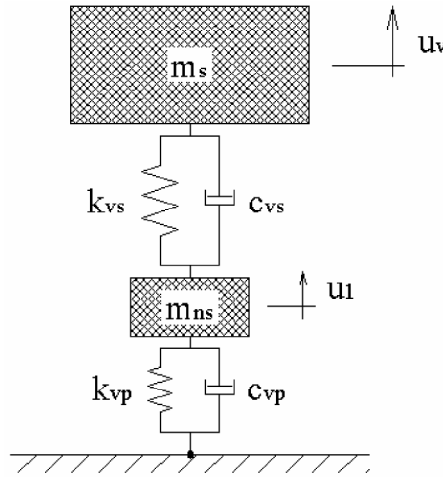


Figura 3. Modelo de veículo II (Silva⁴)

Aplicando-se o Princípio de D'Alembert ao sistema e efetuando-se o equilíbrio das forças atuantes nas massas suspensa e não-suspensa, obtêm-se as duas equações de movimento para este modelo de veículo, sendo estas na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_{ns} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_v \\ \ddot{u}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{vs} & -c_{vs} \\ -c_{vs} & c_{vs} + c_{vp} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_v \\ \dot{u}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{vs} & -k_{vs} \\ -k_{vs} & k_{vs} + k_{vp} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_v \\ u_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Modelo de Veículo III: este modelo é formado por um conjunto de massas, molas e amortecedores e baseia-se no veículo “Tipo 12” preconizado pela norma brasileira NBR 7188⁸. Porém, é importante ressaltar que este embasamento diz respeito apenas às dimensões e ao número de eixos do veículo, pois a referida norma considera que o carregamento imposto pelo mesmo é constituído por um par de forças concentradas que apresentam módulos constantes e iguais entre si ao longo do tempo. O modelo de veículo III, apresentado na Figura 4, possui um nível de complexidade bem superior aos dois últimos, possuindo dois eixos, uma massa suspensa e duas massas não-suspensas. Os significados da massa suspensa, m_s , das massas não-suspensas, m_{ns1} e m_{ns2} , dos conjuntos mola-amortecedor

superiores, k_{vs1} , c_{vs1} e k_{vs2} , c_{vs2} , e dos conjuntos mola-amortecedor inferiores, k_{vp1} , c_{vp1} e k_{vp2} , c_{vp2} , são os mesmos já considerados para o modelo de veículo II. O presente modelo apresenta quatro graus de liberdade, sendo estes os movimentos vertical e de rotação no próprio plano da massa suspensa, descritos, respectivamente, pelas coordenadas u_v e θ_v , e os movimentos verticais das duas massas não-suspensas, dados pelas coordenadas u_1 e u_2 , como ilustrado na Figura 4.

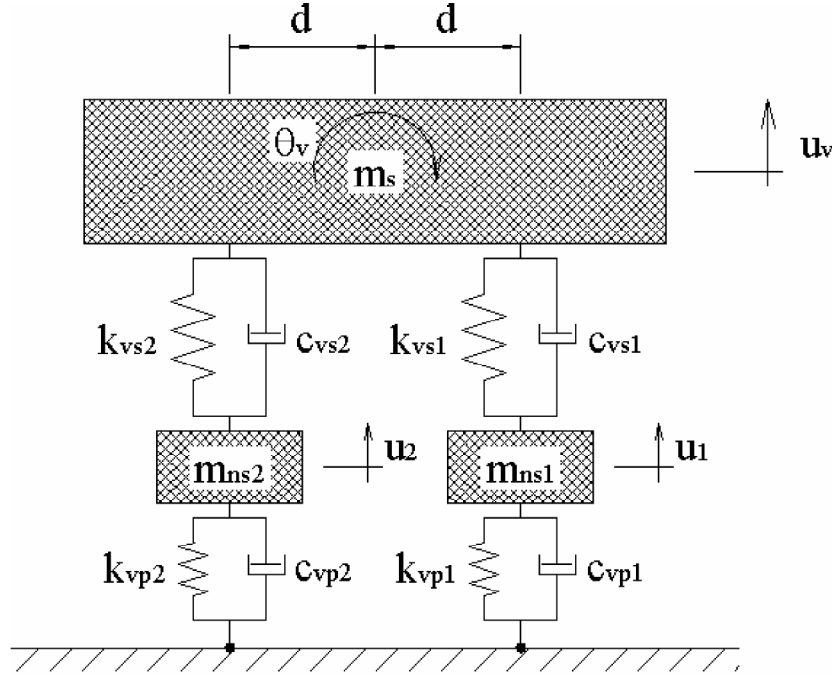


Figura 4. Modelo de veículo III

Uma vez definidos as forças e os momentos atuantes nas massas do veículo, efetua-se o equilíbrio, aplicando-se o Princípio de D'Alembert, obtendo-se assim as quatro equações de movimento, que escritas na forma matricial são dadas por:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{ns1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{ns2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_v \\ \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{\theta}_v \end{Bmatrix} + \\
 & + \begin{bmatrix} c_{vs1} + c_{vs2} & -c_{vs1} & -c_{vs2} & (-c_{vs1} + c_{vs2})d \\ -c_{vs1} & c_{vs1} + c_{vp1} & 0 & c_{vs1}d \\ -c_{vs2} & 0 & c_{vs2} + c_{vp2} & -c_{vs2}d \\ (-c_{vs1} + c_{vs2})d & c_{vs1}d & -c_{vs2}d & (c_{vs1} + c_{vs2})d^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_v \\ \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{\theta}_v \end{Bmatrix} + \\
 & + \begin{bmatrix} k_{vs1} + k_{vs2} & -k_{vs1} & -k_{vs2} & (-k_{vs1} + k_{vs2})d \\ -k_{vs1} & k_{vs1} + k_{vp1} & 0 & k_{vs1}d \\ -k_{vs2} & 0 & k_{vs2} + k_{vp2} & -k_{vs2}d \\ (-k_{vs1} + k_{vs2})d & k_{vs1}d & -k_{vs2}d & (k_{vs1} + k_{vs2})d^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_v \\ u_1 \\ u_2 \\ \theta_v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)
 \end{aligned}$$

Modelo de Veículo IV: este é o modelo de veículo mais complexo desenvolvido nesta investigação, pois é o que apresenta o maior número de graus de liberdade, com um total de cinco. O presente modelo é baseado no veículo “Tipo 45” da norma brasileira NBR 7188⁸, sendo que a observação feita quando da definição do modelo de veículo III é válida

para o presente modelo. Os significados da massa suspensa, m_s , das massas não-suspensas, m_{ns1} , m_{ns2} e m_{ns3} , dos conjuntos mola-amortecedor superiores, k_{vs1} , c_{vs1} , k_{vs2} , c_{vs2} e k_{vs3} , c_{vs3} , e dos conjuntos mola-amortecedor inferiores, k_{vp1} , c_{vp1} , k_{vp2} , c_{vp2} e k_{vp3} , c_{vp3} , são os mesmos já explicados. Este modelo de veículo, apresentado na Figura 5, possui cinco graus de liberdade, sendo estes os movimentos vertical e de rotação no próprio plano da massa suspensa, descritos, respectivamente, pelas coordenadas u_v e θ_v , e os movimentos verticais das três massas não-suspensas, dados pelas coordenadas u_1 , u_2 e u_3 .

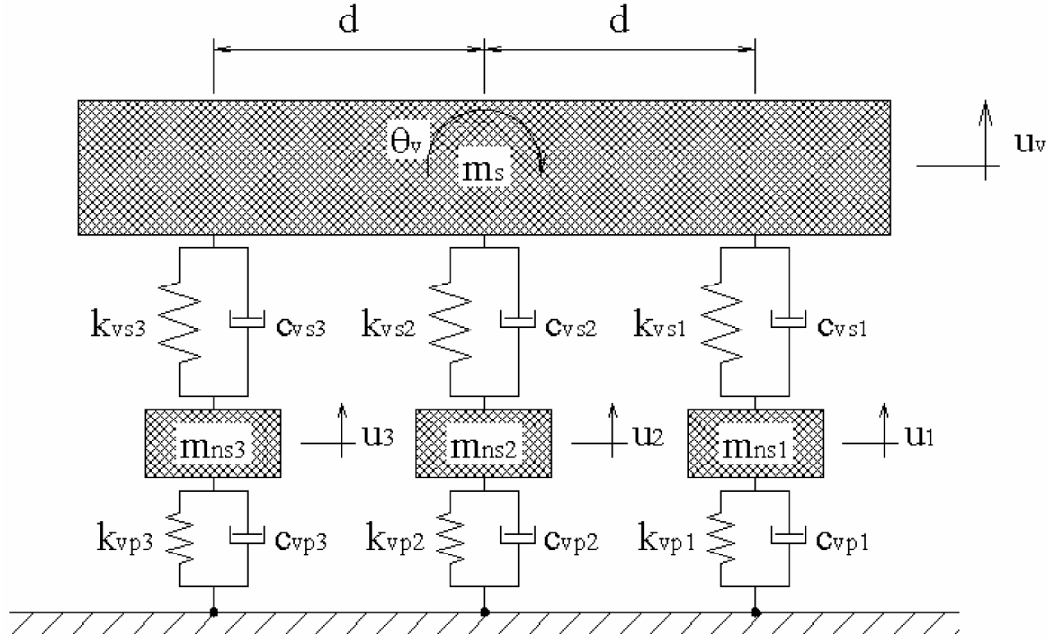


Figura 5. Modelo de veículo IV

Conhecidos as forças e os momentos que atuam nas quatro massas que constituem este modelo de veículo, aplica-se o equilíbrio, considerando-se o Princípio de D'Alembert, obtendo assim as cinco equações de movimento, que na forma matricial são escritas como:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{ns1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{ns2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{ns3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_v \\ \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \\ \ddot{\theta}_v \end{Bmatrix} + \\
 & + \begin{bmatrix} c_{vs1} + c_{vs2} + c_{vs3} & -c_{vs1} & -c_{vs2} & -c_{vs3} & (-c_{vs1} + c_{vs3}) d \\ -c_{vs1} & c_{vs1} + c_{vp1} & 0 & 0 & c_{vs1} d \\ -c_{vs2} & 0 & c_{vs2} + c_{vp2} & 0 & 0 \\ -c_{vs3} & 0 & 0 & c_{vs3} + c_{vp3} & -c_{vs3} d \\ (-c_{vs1} + c_{vs3}) d & c_{vs1} d & 0 & -c_{vs3} d & (c_{vs1} + c_{vs3}) d^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_v \\ \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \\ \dot{\theta}_v \end{Bmatrix} + \\
 & + \begin{bmatrix} k_{vs1} + k_{vs2} + k_{vs3} & -k_{vs1} & -k_{vs2} & -k_{vs3} & (-k_{vs1} + k_{vs3}) d \\ -k_{vs1} & k_{vs1} + k_{vp1} & 0 & 0 & k_{vs1} d \\ -k_{vs2} & 0 & k_{vs2} + k_{vp2} & 0 & 0 \\ -k_{vs3} & 0 & 0 & k_{vs3} + k_{vp3} & -k_{vs3} d \\ (-k_{vs1} + k_{vs3}) d & k_{vs1} d & 0 & -k_{vs3} d & (k_{vs1} + k_{vs3}) d^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_v \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \theta_v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)
 \end{aligned}$$

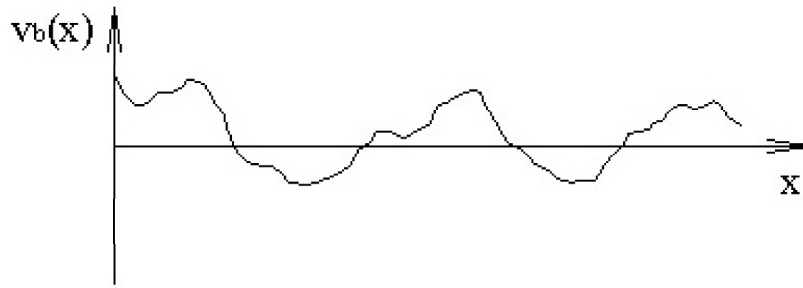


Figura 6. Função de irregularidade não-determinística

Irregularidades superficiais

No que tange à modelagem das irregularidades não-determinísticas, o ponto de partida desta abordagem é a representação da função das irregularidades, $v_b(x)$, com base em seu espectro complexo de Fourier. Assim sendo, a função das irregularidades, $v_b(x)$, Figura 6, é definida pela equação:

$$v_b(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} v_b(\omega) e^{(i\omega)x} d\omega \quad (5)$$

Adota-se para as irregularidades aleatórias uma distribuição normal e um processo randômico fracamente estacionário de segunda ordem. Deste modo, chega-se a uma relação entre a média quadrática da distribuição das irregularidades, $E[(v_b)^2]$, e sua densidade espectral, $\Phi_{v_b v_b}(\omega)$, expressa pela equação:

$$E[(v_b)^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{v_b v_b}(\omega) d\omega \quad (6)$$

Como modelo matemático, adota-se, para representação da densidade espectral das irregularidades da pista, uma função exponencial que tem sido utilizada por diversos pesquisadores, como, por exemplo, Almeida¹, Almeida & Silva², Sedlacek & Drosner⁷, Silva^{3,4} e Wang et al.⁶, dada pela equação:

$$\Phi_{v_b v_b}(\omega) = \Phi(\omega_0) \left[\frac{\omega}{\omega_0} \right]^{-w} \quad (7)$$

Onde:

- $\Phi(\omega_0)$ - coeficiente de amplitude, função da qualidade do pavimento e de ω_0 ;
- ω_0 - frequência básica das irregularidades, igual a 1 m^{-1} ;
- w - ondulabilidade da pista.

Para avaliação dos parâmetros que descrevem a densidade espectral das irregularidades, equação (7), utiliza-se a classificação das irregularidades do pavimento proposta por Braun^{12,13} e utilizada por diversos autores que investigam este assunto, como por exemplo, Almeida¹, Silva^{3,4}, Wang et al.⁶ e Sedlacek & Drosner⁷.

Com a finalidade de gerar-se um conjunto de amostras de irregularidades, propõe-se a discretização da função $v_b(x)$. Deste modo, aproxima-se a distribuição das irregularidades por uma série finita de harmônicos, como mostra a equação (8):

$$v_b(x) = \sum_{i=1}^N v_{bi} \cos[\omega_i x - \varphi_i] \quad (8)$$

Onde:

- v_{bi} - amplitude real da parte harmônica;
- ω_i - frequência do harmônico i ;
- φ_i - ângulo de fase do harmônico i ;
- N - número de harmônicos.

A amplitude da parte harmônica das irregularidades, v_{bi} , é determinada através da densidade espectral das irregularidades, $\Phi_{v_b v_b}(\omega)$. Assim sendo, considerando-se que $\Delta\omega$ denota o intervalo de discretização da função, pode-se escrever:

$$v_{bi} = \sqrt{2\Delta\omega\Phi_{v_b v_b}(\omega_i)} \quad (9)$$

Uma vez que o espectro de $\Phi_{v_b v_b}(\omega)$ não possui informações sobre os ângulos de fase dos harmônicos, φ_i , os mesmos são fixados por meio de números gerados randomicamente a partir de uma distribuição normal. A seguir, nas Figuras 7 e 8 são apresentados exemplos referentes a perfis de irregularidades geradas com base no modelo matemático proposto, para pistas de qualidade excelente e muito ruim, respectivamente.

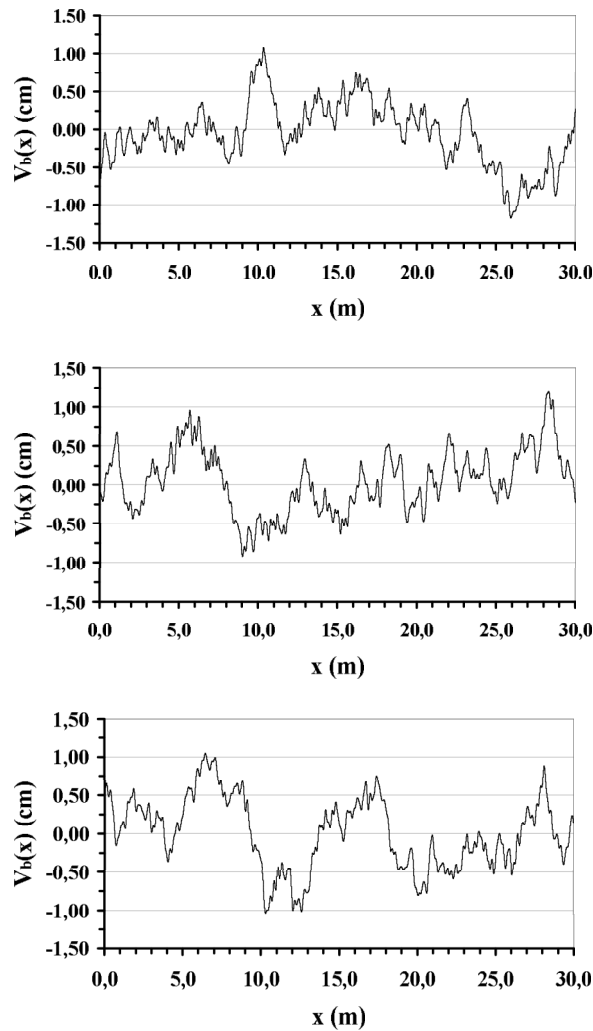


Figura 7. Amostras de irregularidade: qualidade da pista excelente [$\Phi(\omega_0) = 1\text{cm}^3$]

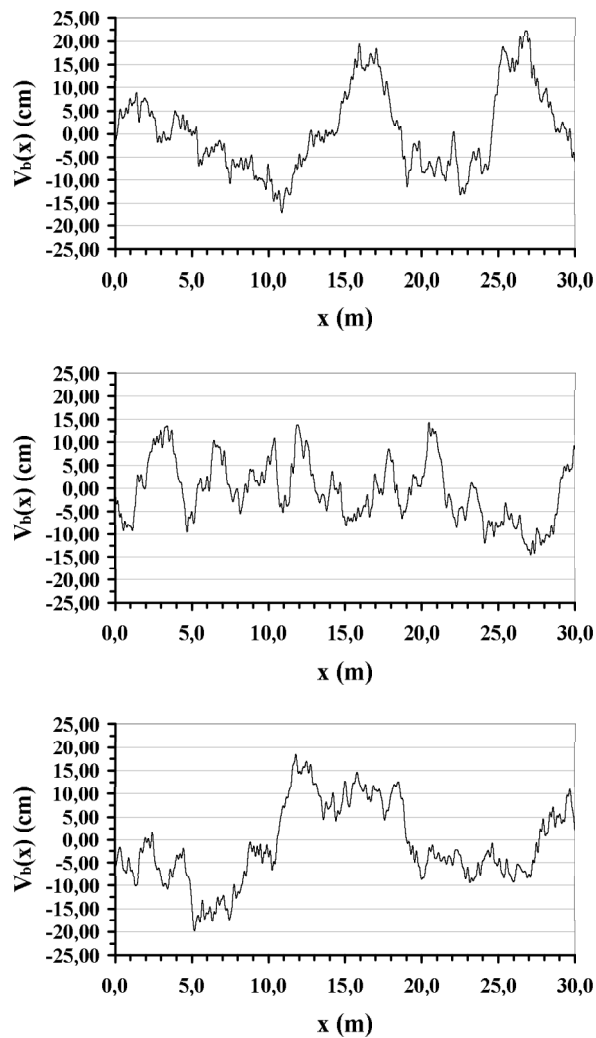


Figura 8. Amostras de irregularidade: Qualidade da pista: muito ruim $[\Phi(\omega_0) = 256\text{cm}^3]$

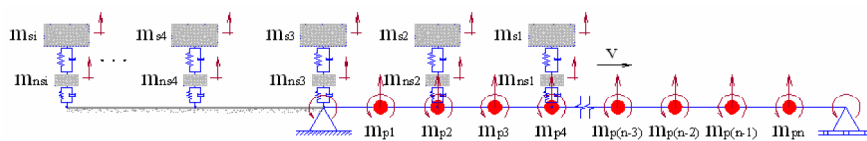


Figura 9. Sistema veículo-ponte

Sistema veículo-ponte

O(s) veículo(s) e o tabuleiro constituem um sistema único através da formulação das matrizes de massa, amortecimento, rigidez e de cargas, necessárias para formulação e resolução da equação de movimento. Objetivando facilitar a organização e atualização dessas matrizes, as primeiras linhas e colunas das mesmas são destinadas para os veículos do comboio. A Figura 9 apresenta uma representação genérica do sistema veículo-ponte, com base no emprego do modelo de veículo II.

Os veículos percorrem a ponte com uma determinada velocidade, e seu efeito sobre esta é determinado ao longo do tempo. Devido ao fato de que os veículos e a ponte formam um sistema único, estes têm influência marcante na equação de movimento do sistema e, portanto, em virtude dos mesmos serem elementos móveis, a cada nova posição dessas viaturas o sistema é modificado, induzindo, conseqüentemente, alterações na equação de movimento, mais especificamente nos elementos associados à rigidez e ao amortecimento do sistema veículo-ponte.

A rigor, essa modificação na equação de movimento deve ser processada a cada avanço do veículo sobre a viga, acarretando um grande esforço computacional. Deste modo, com o objetivo de simplificar os cálculos, as matrizes de rigidez e amortecimento são modificadas somente quando o veículo ultrapassa a metade de cada elemento da viga. Esta medida reduz consideravelmente o número de modificações e, portanto, o esforço computacional na solução da equação de movimento, sem grande prejuízo para a precisão dos resultados, Silva^{3,4}.

Em síntese, o veículo é posicionado nos nós e sua ação, entre esses nós, é marcada pelas cargas nodais equivalentes, que são calculadas para cada intervalo de tempo, como se o veículo percorresse a viga normalmente. Deve-se enfatizar, ainda, que a imprecisão gerada pela redução no número de modificações nas matrizes do sistema é pequena, sendo absolutamente tolerável.

Na concepção do comboio infinito, é mantido um espaçamento constante entre os veículos, igual ao comprimento de um elemento finito de barra, ou a um múltiplo deste, ressaltando que as matrizes do sistema veículo-ponte permanecem inalteradas após o tabuleiro estar completamente carregado. Tal medida reduz consideravelmente o esforço computacional na solução da equação de movimento, sem grande prejuízo para a precisão dos resultados para uma extensão corrente dos elementos de viga de 1/8 a 1/10 do comprimento do vão, Silva^{3,4}.

Ressalta-se que a concepção do comboio infinito de veículos relaciona-se diretamente com a fase permanente da resposta, que incorpora repetições de valores extremos, de interesse direto para uma análise de fadiga do material. Por outro lado, a própria natureza da excitação referente às irregularidades da pista, definidas segundo modelo não-determinístico, está associada a processos fracamente estacionários.

A resposta da estrutura é obtida mediante a integração das equações de movimento do sistema veículo-ponte, passo a passo, com base em fórmulas fundamentadas na variação linear da aceleração ao longo do incremento de tempo. Este incremento de tempo é considerado suficientemente pequeno para ajustar-se aos parâmetros de tempo em jogo, Silva^{3,4}.

A introdução do efeito das irregularidades da pista na equação de movimento do sistema veículo-viga é feita considerando-se que, para os veículos, tais irregularidades assemelham-se a deslocamentos de base. Deste modo, durante o intervalo de tempo em que o veículo está atravessando uma irregularidade do pavimento, este transmite ao tabuleiro da ponte uma força variável de acordo com suas propriedades dinâmicas, associadas à rigidez e ao amortecimento.

O carregamento exercido pelo(s) veículo(s) sobre a ponte é formado por cargas concentradas aplicadas nos pontos de contato deste(s) com o tabuleiro, sendo o módulo desta força variável, função das características do(s) veículo(s) e das irregularidades do tabuleiro. Para o modelo de veículo I, esta força é dada pela equação:

$$f_v = m_v g - c_v (\dot{u}_v - \dot{u}_{ir}) - k_v (u_v - u_{ir}) \quad (10)$$

Em se tratando do modelo de veículo II, a força exercida pelo veículo sobre o tabuleiro é:

$$f_v = (m_s + m_{ns}) g - c_{vp} (\dot{u}_1 - \dot{u}_{ir}) - k_{vp} (u_1 - u_{ir}) \quad (11)$$

Para o modelo de veículo III, a força é dada, para cada eixo do mesmo, por:

$$f_{vi} = \left(\frac{m_s}{2} + m_{nsi} \right) g - c_{vpi} (\dot{u}_i - \dot{u}_{ir}) - k_{vpi} (u_i - u_{ir}), \quad i = 1, 2 \quad (12)$$

Por fim, para o modelo de veículo IV, esta força é dada, para cada um de seus três eixos, pela equação:

$$f_{vi} = \left(\frac{m_s}{3} + m_{nsi} \right) g - c_{vpi} (\dot{u}_i - \dot{u}_{ir}) - k_{vpi} (u_i - u_{ir}), \quad i = 1, 2, 3 \quad (13)$$

Onde:

- u_i e $\dot{u}_i$ - deslocamento e velocidade da massa não-suspensa i do veículo, respectivamente;
- u_{ir} e $\dot{u}_{ir}$ - função irregularidade e sua primeira derivada no eixo do veículo, respectivamente.

Calculada a força exercida por cada eixo do(s) veículo(s), determina-se o vetor de cargas nodais equivalentes para o tabuleiro discretizado em elementos finitos. Este vetor, para um elemento de viga com uma carga concentrada fora do nó, é dado por:

$$r = \frac{f_v}{l^3} \begin{Bmatrix} l^3 - 3a^2l + 2a^3 \\ (l^2 - 2al + a^2) al \\ (3l - 2a) a^2 \\ (a - l) a^2 l \end{Bmatrix} \quad (14)$$

Onde:

- l - comprimento do elemento finito;
- a - distância entre o nó esquerdo do elemento e o ponto de aplicação da carga f_v .

O vetor de cargas nodais equivalentes para toda a malha de elementos que constitui o tabuleiro, R_P , é obtido a partir do vetor r , de acordo com a teoria do Método dos Elementos Finitos¹¹.

MODELAGEM DA CARGA MÓVEL

A carga móvel é modelada com base em uma série infinita de veículos, regularmente espaçados, deslocando-se sobre o tabuleiro com velocidade constante, v . Assumindo-se que l seja a distância entre dois veículos sucessivos e que os carros entrem um após o outro no tabuleiro da obra-de-arte, gera-se a partir dessa repetição, ao longo do tempo, uma frequência de excitação de carregamento, ou de travessia, $f_c = v/l$, associada ao movimento desses veículos sobre o tabuleiro, Figura 10.

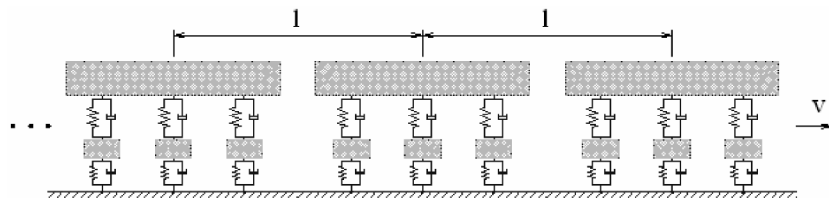


Figura 10. Representação do comboio infinito de veículos

Após um determinado período de tempo, t_1 , denominado de tempo de travessia, o primeiro veículo do comboio atinge o final da ponte e, a partir desse instante, a massa total dos veículos sobre a obra permanece praticamente constante. Sob essas condições,

o tabuleiro atingirá uma situação em que predomina a fase permanente da resposta, que incorpora repetições de valores extremos, de interesse direto para uma análise de fadiga do material, Silva^{3,4}.

ANÁLISE PARAMÉTRICA

A análise paramétrica é conduzida com base na implementação computacional da metodologia de análise no domínio do tempo e sua finalidade básica é a de avaliar a consistência e eficácia do método e, ainda, os efeitos dinâmicos provenientes do perfil irregular do pavimento, ocasionado pelo desgaste da superfície de rolamento ao longo do tempo, sobre o comportamento estrutural de pontes rodoviárias.

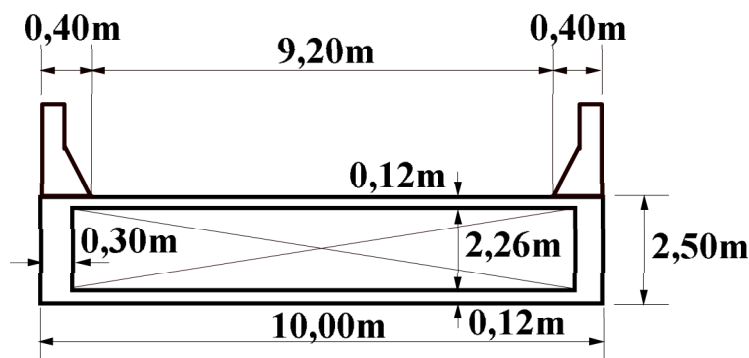


Figura 11. Seção transversal da ponte analisada neste trabalho

Os tabuleiros das pontes rodoviárias empregados neste estudo são constituídos de concreto armado, com seção do tipo caixa e inércia constante ao longo de seu comprimento, Figura 11. Suas características geométricas são baseadas em uma ponte rodoviária, simplesmente apoiada, localizada na Rodovia Rio-Santos, zona oeste da cidade do Rio de Janeiro. O tabuleiro adotado apresenta as seguintes características, mostradas na Tabela I:

Grandeza	Valor Adotado	Unidade
Área da seção transversal (A)	3,756	m ²
Massa específica (ρ)	2449,50	kg/m ³
Massa distribuída ($\bar{m}$)	9200,0	kg/m
Momento de inércia (J)	3,98	m ⁴
Módulo de elasticidade (E)	3,0x10 ⁷	kN/m ²
Fração de amortecimento (ξ)	0,03	-

Tabela I. Características dos tabuleiros empregados nas análises

Neste trabalho, consideram-se dois sistemas estruturais para o tabuleiro da obra-de-arte: biapoiado com e sem balanços. Em ambos os sistemas o vão é de 30,0 m, e para aquele que apresenta segmentos em balanço, a extensão destes é de 7,5 m, cada um.

Um ponto bastante importante neste estudo diz respeito aos valores das frequências naturais dos veículos isolados, considerados para efeito de análise sobre uma base rígida. Em todos os modelos de veículo implementados nesta investigação (modelos de veículo I até IV, Figuras 2 a 5), todas as frequências naturais, correspondentes à translação da massa suspensa e da(s) massa(s) não-suspensa(s), são feitas iguais a 3,0 Hz e 20,0 Hz, respectivamente, Silva^{3,4}. Contudo, os veículos com mais de um eixo (modelos de veículo III

e IV) possuem uma frequência de valor mais baixo, associada à rotação da massa suspensa dos modelos, a qual é igual a 2,3Hz, no caso do modelo de veículo III, Figura 4, e 1,9Hz, referente ao modelo de veículo IV, Figura 5.

O coeficiente relativo de amortecimento, ξ , adotado para o modo de vibração natural com predominância de deslocamentos da massa suspensa dos veículos é igual a 0.1 (10%), Silva^{3,4}. A massa total de todos os modelos de veículo utilizados é de 450kN, sendo que a relação entre a massa suspensa e a(s) massa(s) não-suspensa(s) igual a 8,0 em todos os casos, Silva^{3,4}.

Com relação ao perfil do pavimento, são geradas séries de amostras de irregularidades de modo a obter-se uma regularidade estatística em termos dos valores máximos médios da resposta. Convém chamar a atenção do leitor para o fato de que todos os resultados obtidos ao longo do trabalho referem-se à fase permanente da resposta e são normalizados pelos respectivos efeitos estáticos máximos obtidos para a ponte em estudo.

A distribuição do perfil irregular do pavimento, irregularidades da pista, é considerada segundo modelo randômico com base na densidade espectral do pavimento, Equações (6) e (7). O tipo de pista escolhido para a análise é o de qualidade excelente, observando-se que essa categoria é definida segundo a classificação das irregularidades do pavimento, proposta por Braun^{12,13}.

Comportamento dinâmico do sistema veículo-ponte

Inicialmente, realiza-se um estudo do comportamento geral do sistema veículo-ponte empregando-se as pontes biapoiadas com e sem balanços, definidas anteriormente. Desta forma, obtêm-se os deslocamentos, momentos fletores e reações de apoio, ao longo do tempo, devidos à simulação da passagem de comboios de veículos sobre o tabuleiro com pavimento irregular.

Adotam-se, para esta análise, os quatro modelos de veículos (Figuras 2 a 5), na velocidade de 80,0 km/h. A velocidade dos veículos e o espaçamento entre os mesmos são constantes ao longo de sua travessia sobre a ponte. Este espaçamento é igual a 6,0 m, definido em função das dimensões das viaturas empregadas neste trabalho, de forma o comboio simule a situação de maior tráfego possível sobre o tabuleiro.

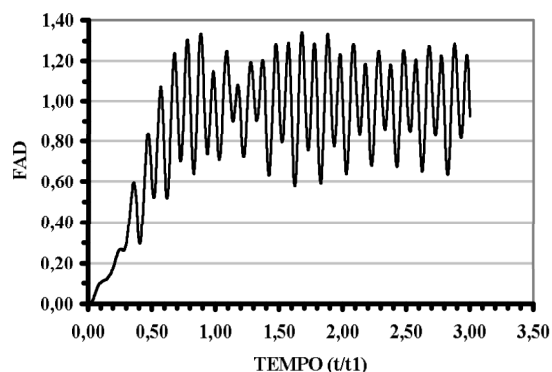
A resposta do sistema veículo-ponte é obtida com base na consideração do efeito combinado da mobilidade dos veículos com a interação destes com as irregularidades do pavimento. Vale acrescentar que as amplificações provocadas somente pelo efeito da passagem das viaturas sobre o tabuleiro, considerando-se neste caso um pavimento perfeitamente liso, não são muito elevadas, sendo próximas da unidade, Almeida¹ e Silva^{3,4}.

A seguir, nas Figuras 12 a 15, apresentam-se as respostas do sistema veículo-ponte ao longo do tempo, pelas grandezas: FAD - fator de amplificação dinâmica, dado pela relação entre o valor da grandeza dinâmica e seu correspondente valor estático máximo; t - tempo decorrido da análise dinâmica; t_1 - tempo de travessia da ponte de um veículo na velocidade de 80,0 km/h. Os gráficos a seguir encontram-se devidamente organizados por tipo de veículo (modelos I, II, III e IV) e por sistema estrutural (biapoiado sem balanços e com balanços), nesta seqüência.

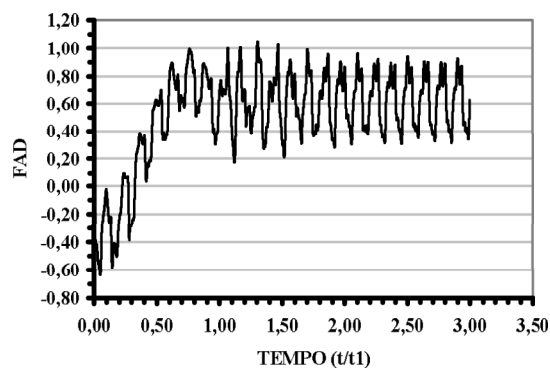
Modelo de Veículo I: na Figura 12, são apresentados os resultados obtidos para este modelo de veículo, para os dois sistemas estruturais considerados, nas seções onde estes apresentam seus valores máximos.

Modelo de Veículo II: na Figura 13, são apresentados os resultados obtidos para este modelo de veículo, para os dois sistemas estruturais considerados, nas seções onde estes apresentam seus valores máximos.

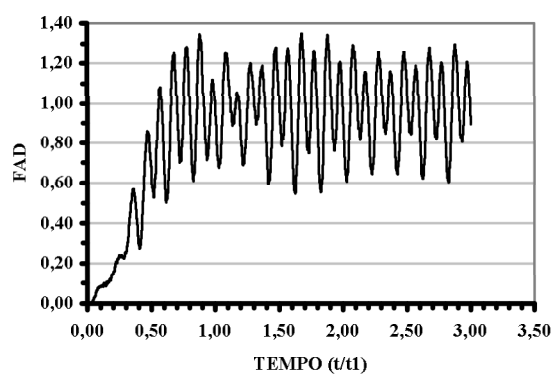
Modelo de Veículo III: na Figura 14, são apresentados os resultados obtidos para este modelo de veículo, para os dois sistemas estruturais considerados, nas seções onde estes apresentam seus valores máximos.



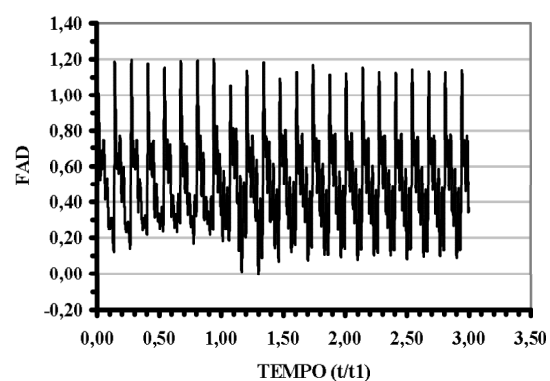
(a.1) Deslocamentos da seção central



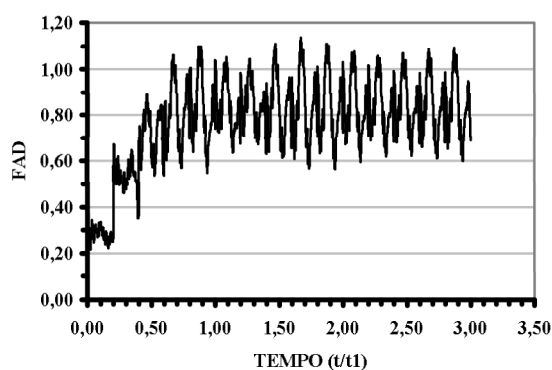
(b.1) Deslocamentos da extremidade do balanço esquerdo



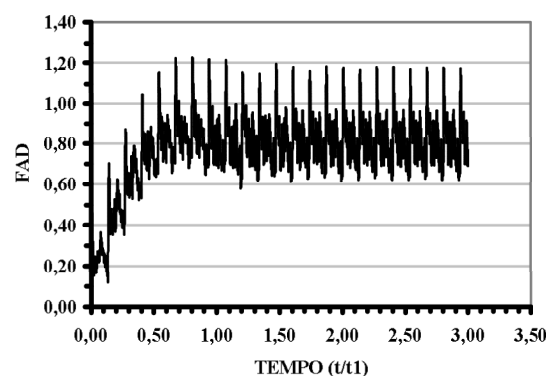
(a.2) Momentos fletores na seção central



(b.2) Momentos fletores na seção do apoio esquerdo

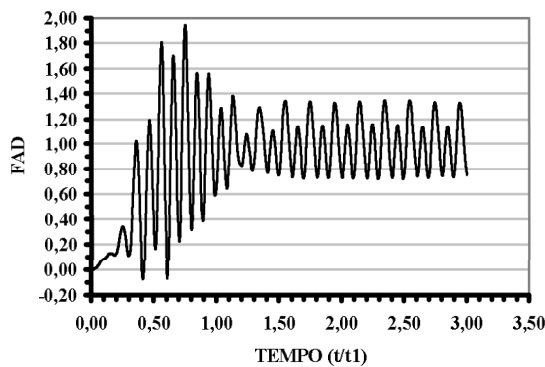


(a.3) Reações do apoio esquerdo

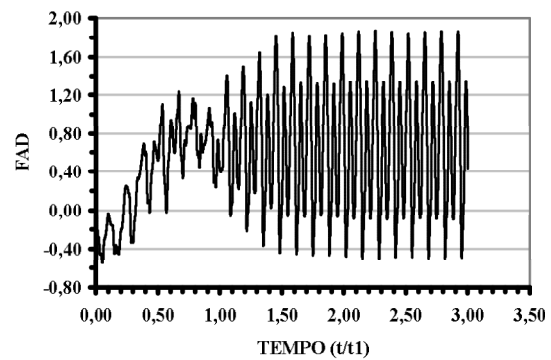


(b.3) Reações do apoio esquerdo

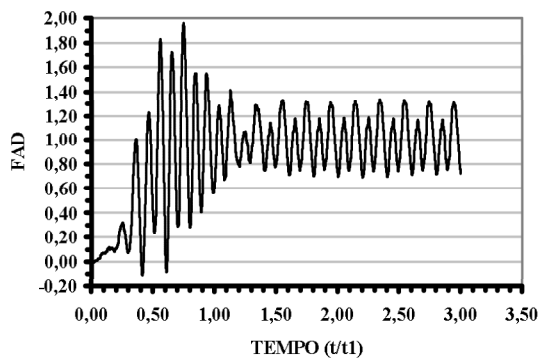
Figura 12. Gráficos do comportamento geral ao longo do tempo: efeito combinado da mobilidade dos veículos com as irregularidades superficiais do pavimento; modelo de veículo I; (a) ponte biapoiada sem balanços; (b) ponte biapoiada com balanços



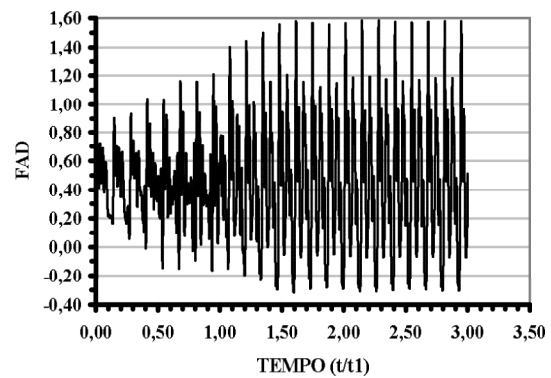
(a.1) Deslocamentos da seção central



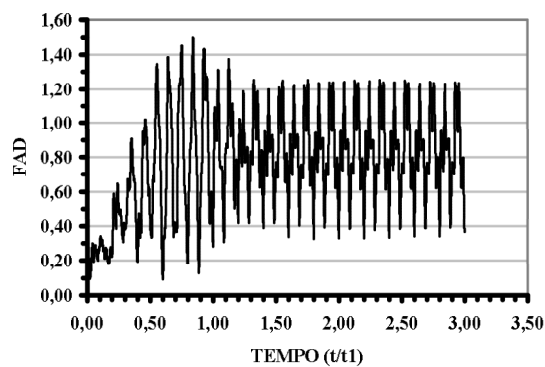
(b.1) Deslocamentos da extremidade do balanço esquerdo



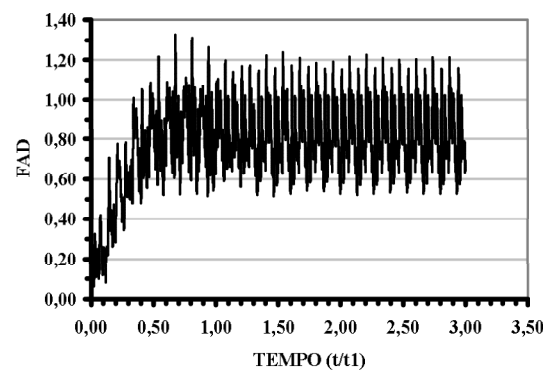
(a.2) Momentos fletores na seção central



(b.2) Momentos fletores na seção do apoio esquerdo

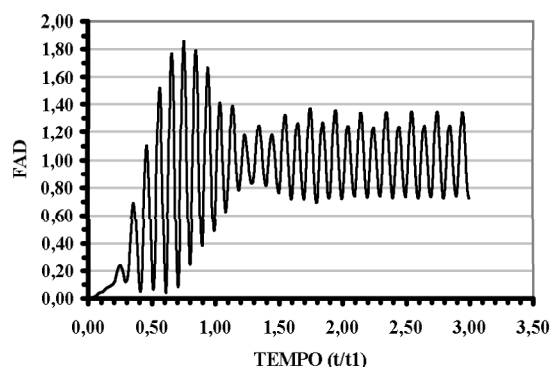


(a.3) Reações do apoio esquerdo

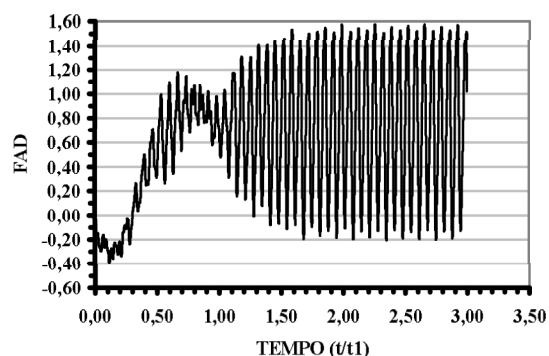


(b.3) Reações do apoio esquerdo

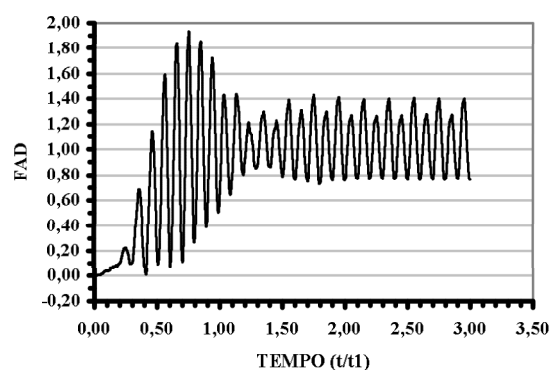
Figura 13. Gráficos do comportamento geral ao longo do tempo: efeito combinado da mobilidade dos veículos com as irregularidades superficiais do pavimento; modelo de veículo II; (a) ponte biapoiada sem balanços; (b) ponte biapoiada com balanços



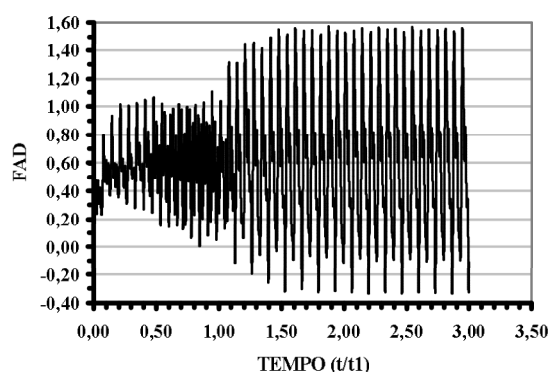
(a.1) Deslocamentos da seção central



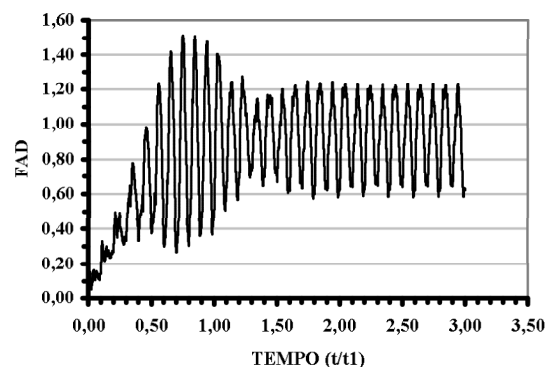
(b.1) Deslocamentos da extremidade do balanço esquerdo



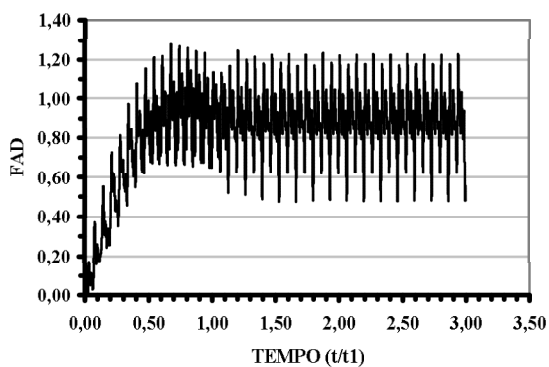
(a.2) Momentos fletores na seção central



(b.2) Momentos fletores na seção do apoio esquerdo



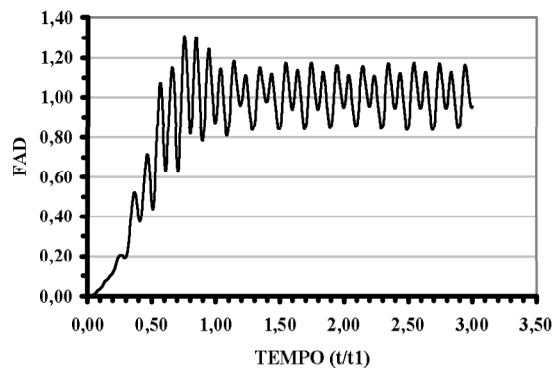
(a.3) Reações do apoio esquerdo



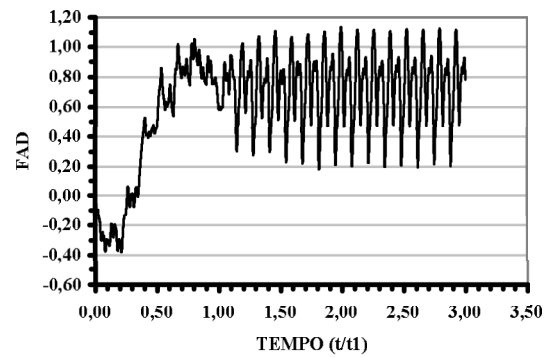
(b.3) Reações do apoio esquerdo

Figura 14. Gráficos do comportamento geral ao longo do tempo: efeito combinado da mobilidade dos veículos com as irregularidades superficiais do pavimento; modelo de veículo III; (a) ponte biapoiada sem balanços; (b) ponte biapoiada com balanços

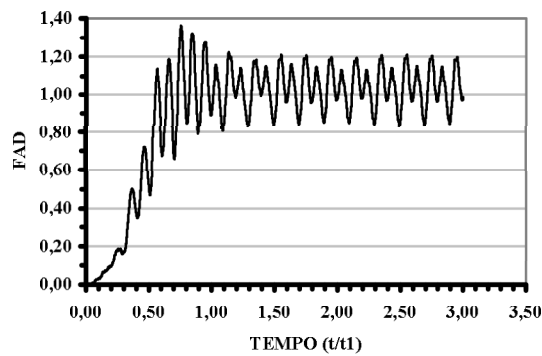
Modelo de Veículo IV: na Figura 15, são apresentados os resultados obtidos para este modelo de veículo, para os dois sistemas estruturais considerados, nas seções onde estes apresentam seus valores máximos.



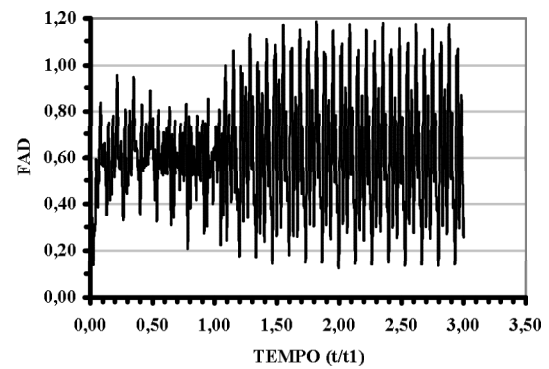
(a.1) Deslocamentos da seção central



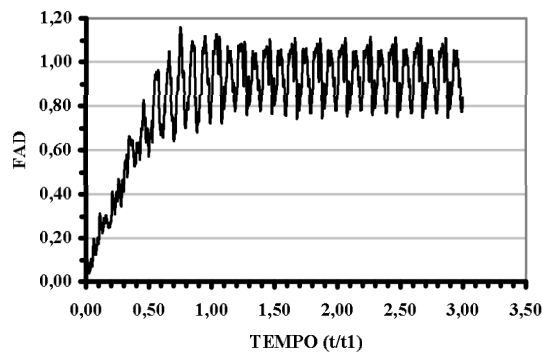
(b.1) Deslocamentos da extremidade do balanço esquerdo



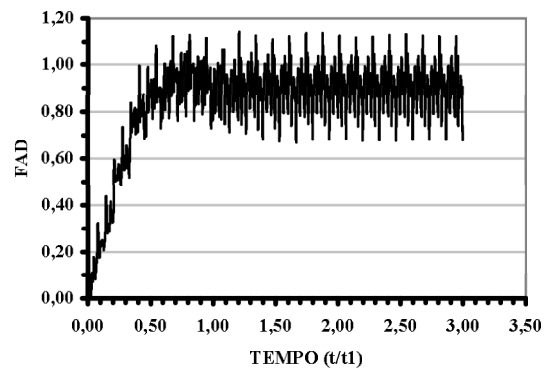
(a.2) Momentos fletores na seção central



(b.2) Momentos fletores na seção do apoio esquerdo



(a.3) Reações do apoio esquerdo



(b.3) Reações do apoio esquerdo

Figura 15. Gráficos do comportamento geral ao longo do tempo: efeito combinado da mobilidade dos veículos com as irregularidades superficiais do pavimento; modelo de veículo IV; (a) ponte biapoiada sem balanços; (b) ponte biapoiada com balanços

Como já mencionado anteriormente, os fatores de amplificação dinâmicos obtidos quando se considera somente o efeito da mobilidade da carga sobre o tabuleiro apresentam valores muito próximos daqueles obtidos em uma análise estática para a condição de carregamento

correspondente, Almeida¹ e Silva^{3,4}. Contudo, conforme pode-se observar nos gráficos das Figuras 12 a 15, esses fatores de amplificação crescem substancialmente, chegando mesmo a ultrapassar os efeitos devidos a presença estática dos veículos, quando se considera o efeito oriundo da interação dinâmica das viaturas do comboio com as irregularidades da pista, mesmo adotando-se um pavimento de qualidade excelente.

De modo geral, verifica-se também que os valores máximos da resposta do sistema veículo-estrutura ocorrem na fase permanente, onde se observa a nítida predominância de uma frequência de carregamento com período de 0,27 s, correspondente ao tempo de travessia dos veículos do comboio, com velocidade constante, sobre quatro elementos finitos de viga, $T = l/\nu$, em que l é o espaçamento entre as viaturas, neste estudo feito igual a 6,0 m, e ν a velocidade dos veículos, nesta análise adotada igual a 80 km/h.

Por fim, constata-se na fase transiente da maioria dos gráficos a sucessiva entrada na ponte dos veículos do comboio, pelas mudanças bruscas da curva nos instantes em que esses veículos encontram-se na posição correspondente à distância que os separa dos veículos anteriores. Assim sendo, as curvas representativas da resposta do sistema deslocam-se para a direita com amplificações bem mais elevadas, até que as pontes estejam completamente carregadas e os sistemas atinjam a fase permanente da resposta.

Análise estatística dos resultados

Nesta etapa do trabalho, realiza-se uma análise estatística dos resultados obtidos. As Tabelas II a VII, apresentadas a seguir, mostram os efeitos máximos médios para os modelos da ponte biapoiada sem balanços e com balanços, considerando-se somente a interação dos veículos com a superfície irregular do tabuleiro, não considerando-se então o efeito da mobilidade das cargas, que encontra-se muito próximo da unidade, Almeida¹ e Silva^{3,4}.

Essas tabelas apresentam os resultados da análise com base no fator de amplificação dinâmico médio, $[FAD]_{\text{médio}}$, obtido para 50 perfis de irregularidade distintos, Silva^{3,4}, que representa a relação entre os efeitos dinâmicos máximos médios, μ_R , e os efeitos estáticos máximos correspondentes, sendo R uma variável genérica da resposta do sistema. São apresentados ainda a média quadrática, $E[R^2]$, a variância, $(\sigma_R)^2$, e o desvio padrão, σ_R , todos associados à resposta do sistema.

As Tabelas II a VII encontram-se organizadas pelo tipo de sistema estrutural do tabuleiro (biapoiado sem e com balanços) e, ainda, pela grandeza física analisada (deslocamento, momento fletor e reação de apoio).

Viga Biapoiada Sem Balanços: nas Tabelas II, III e IV, são apresentados os resultados obtidos para este sistema estrutural, para os quatro modelos de veículos considerados, nas seções onde ocorrem os valores máximos.

Modelo de Veículo	$[FAD]_{\text{médio}}$ μ_V / V_{est}	Média μ_v (cm)	Média Quadrática $E[V^2]$ (cm ²)	Variância $(\sigma_V)^2$ (cm ²)	Desvio Padrão σ_V (cm)	σ_V / μ_v
Tipo I (01 Massa)	0,36	0,24	0,067	0,00	0,00	0,00
Tipo I (02 Massas)	0,72	0,48	0,257	0,0234	0,153	0,32
Tipo II	0,62	0,41	0,196	0,0247	0,157	0,38
Tipo III	0,29	0,19	0,040	0,00	0,00	0,00

Tabela II. Deslocamentos máximos médios na seção central – efeito das irregularidades; velocidade = 80 km/h; qualidade do pavimento: excelente

Modelo de Veículo	$[FAD]_{\text{médio}}$ μ_M / M_{est}	Média μ_M (kN m)	Média Quadrática $E[M^2]$ (kN ² m ²)	Variância $(\sigma_M)^2$ (kN ² m ²)	Desvio Padrão σ_M (kN m)	σ_M / μ_M
Tipo I (01 Massa)	0,38	3,33x103	1,23x107	1,18x106	1,09x103	0,33
Tipo I (02 Massas)	0,75	6,58x103	4,73x107	3,88x106	1,97x103	0,30
Tipo II	0,68	5,74x103	3,73x107	4,23x106	2,06x103	0,36
Tipo III	0,33	2,82x103	8,65x107	5,49x106	7,41x103	0,26

Tabela III. Momentos fletores máximos médios na seção central – efeito das irregularidades; velocidade = 80 km/h; qualidade do pavimento: excelente

Modelo de Veículo	$[FAD]_{\text{médio}}$ μ_R / R_{est}	Média μ_R (kN)	Média Quadrática $E[R^2]$ (kN ²)	Variância $(\sigma_R)^2$ (kN ²)	Desvio Padrão σ_R (kN)	σ_R / μ_R
Tipo I (01 Massa)	0,32	4,32x102	2,05x105	1,57x104	1,25x102	0,29
Tipo I (02 Massas)	0,81	1,09x103	1,26x106	5,67x104	2,38x102	0,22
Tipo II	0,67	8,29x102	7,38x105	4,84x104	2,20x102	0,27
Tipo III	0,40	4,95x102	2,63x105	1,50x104	1,23x102	0,25

Tabela IV. Reações máximas médias do apoio esquerdo – efeito das irregularidades; velocidade = 80 km/h; qualidade do pavimento: excelente

Viga Biapoiada Com Balanço: nas Tabelas V, VI e VII, são apresentados os resultados obtidos para este sistema estrutural, para os quatro modelos de veículos considerados, nas seções onde ocorrem os valores máximos.

Modelo de Veículo	$[FAD]_{\text{médio}}$ μ_V / V_{est}	Média μ_v (cm)	Média Quadrática $E[V^2]$ (cm ²)	Variância $(\sigma_V)^2$ (cm ²)	Desvio Padrão σ_V (cm)	σ_V / μ_v
Tipo I (01 Massa)	0,44	0,21	0,052	0,00	0,00	0,00
Tipo I (02 Massas)	1,32	0,64	0,446	0,0367	0,1916	0,30
Tipo II	1,16	0,50	0,279	0,0247	0,157	0,31
Tipo III	0,66	0,29	0,090	0,00	0,00	0,00

Tabela V. Deslocamentos máximos médios na extremidade do balanço esquerdo – efeito das irregularidades; velocidade = 80 km/h; qualidade do pavimento: excelente

Modelo de Veículo	$[FAD]_{\text{médio}}$ μ_M / M_{est}	Média μ_M (kN m)	Média Quadrática $E[M^2]$ (kN ² m ²)	Variância $(\sigma_M)^2$ (kN ² m ²)	Desvio Padrão σ_M (kN m)	σ_M / μ_M
Tipo I (01 Massa)	0,60	2,43x103	7,11x106	1,14x106	1,07x103	0,44
Tipo I (02 Massas)	1,39	5,63x103	3,44x107	2,58x106	1,61x103	0,29
Tipo II	1,39	4,22x103	1,90x107	1,28x106	1,13x103	0,27
Tipo III	1,11	3,24x103	1,13x107	8,03x105	8,99x102	0,28

Tabela VI. Momentos fletores máximos médios na seção sobre o apoio esquerdo – efeito das irregularidades; velocidade = 80 km/h; qualidade do pavimento: excelente

Modelo de Veículo	$[FAD]_{\text{médio}}$ μ_R / R_{est}	Média μ_R (kN)	Média Quadrática $E[R^2]$ (kN ²)	Variância $(\sigma_R)^2$ (kN ²)	Desvio Padrão σ_R (kN)	σ_R / μ_R
Tipo I (01 Massa)	0,33	6,76x10 ²	5,36x10 ⁵	7,48x10 ⁴	2,73x10 ²	0,40
Tipo I (02 Massas)	0,71	1,45x10 ³	2,29x10 ⁶	1,56x10 ⁵	3,95x10 ²	0,27
Tipo II	0,54	1,03x10 ³	1,12x10 ⁶	8,91x10 ⁴	2,99x10 ²	0,29
Tipo III	0,46	8,67x10 ²	8,30x10 ⁵	6,90x10 ⁴	2,63x10 ²	0,30

Tabela VII. Reações máximas médias do apoio esquerdo – efeito das irregularidades; velocidade = 80 km/h; qualidade do pavimento: excelente

Dentro do objetivo desta análise, focalizam-se, agora, os valores do fator de amplificação dinâmico médio, $[FAD]_{\text{médio}}$, que representa a relação entre os efeitos dinâmicos máximos médios e os efeitos estáticos máximos, Tabelas II a VII.

Verifica-se, novamente, que as ações dinâmicas provenientes das irregularidades superficiais, mesmo quando são considerados pavimentos de qualidade excelente, representam uma parcela substancial na resposta do sistema veículo-ponte, Tabelas II a VII, chegando mesmo a ultrapassar, em alguns casos, Tabelas V e VI, os efeitos produzidos pela ação estática devida ao peso das viaturas.

Pode-se dizer também que a relação entre os valores médios dos efeitos máximos da resposta do sistema veículo-ponte correspondentes ao efeito dinâmico proveniente das irregularidades da pista de qualidade muito ruim e qualidade excelente tende a 16 e para os valores médios quadráticos desses efeitos, esta relação tende a 256, Almeida¹ e Silva^{3,4}, Tabelas II a VII. Isto se deve ao fato do coeficiente representativo da qualidade do pavimento, $\Phi(\omega_0)$ é igual a 256 cm³ para pistas muito ruins e 1 cm³ para pistas de qualidade excelente. Assim sendo, pode-se proceder à análise considerando-se um valor unitário para $\Phi(\omega_0)$ e depois aplicar um fator multiplicativo de acordo com a qualidade do pavimento utilizado.

Efeito da frequência de travessia dos veículos

Em decorrência das elevadas amplificações produzidas pela interação dos veículos com as irregularidades do pavimento e sua associação com a frequência da excitação, realiza-se um estudo para determinar as velocidades críticas de travessia dos diversos tipos de veículos. Para isto, varia-se a frequência de carregamento, sendo esta função da velocidade das viaturas e do espaçamento entre as mesmas.

Desta forma, são elaborados espectros de resposta com base nos valores dos fatores de amplificação dinâmicos médios, $[FAD]_{\text{médio}}$, e do parâmetro de frequência, β , definido pela relação $\nu/(l.f_{01})$, na qual ν representa a velocidade dos veículos do comboio, l denota o espaçamento entre os carros e f_{01} é a frequência da excitação que pode ser associada aos veículos e/ou ao tabuleiro, dependendo da faixa de frequência e do caso em estudo.

O fator de amplificação dinâmico médio, $[FAD]_{\text{médio}}$, é obtido pela relação entre o efeito dinâmico máximo médio, μ , para 50 perfis de irregularidade distintos [42], e o correspondente efeito estático máximo. Esta grandeza exprime uma quantidade que pode bem representar as diversas variações e singularidades do problema em estudo, pois existe uma afinidade destacada entre a definição do $[FAD]_{\text{médio}}$ e a metodologia utilizada na prática de projeto para o cálculo de diversas grandezas determinantes. Desta forma, o $[FAD]_{\text{médio}}$ pode ser utilizado para uma crítica às prescrições da norma brasileira⁹.

Convém chamar a atenção do leitor para o fato de que os espectros de resposta apresentados fornecem uma visão geral acerca da interação dinâmica existente entre os comboios dos diversos tipos de veículos e o tabuleiro das obras-de-arte. Assim, são gerados os es-

pectros para as pontes biapoiadas com e sem balanços, definidas anteriormente, sendo o espaçamento entre os veículos constante, igual a 6,0 m, e a qualidade do pavimento excelente. O intervalo de velocidades considerado nesta análise varia de 20 km/h a 200 km/h. Vale ressaltar que estes espectros são elaborados considerando-se somente o efeito da interação dos veículos com as irregularidades superficiais, não se levando em conta seu peso.

A coordenada central do modelo biapoiado sem balanços representa o foco central da análise quantitativa e qualitativa dos fatores de amplificação dinâmicos. No que tange a ponte biapoiada com balanços, à extremidade do balanço esquerdo e à seção sobre o apoio esquerdo são as seções onde esses fatores de amplificação são obtidos. Com relação às reações de apoio, os espectros indicam, em ambos os sistemas estruturais, as respostas dinâmicas calculadas apenas nos apoios esquerdos das estruturas.

Viga Biapoiada Sem Balanço: nas Figuras 16, 17, 18 e 19, são apresentados os espectros obtidos para este sistema estrutural, no que tange aos quatro modelos de veículos considerados neste estudo, nas seções onde ocorrem os efeitos máximos.

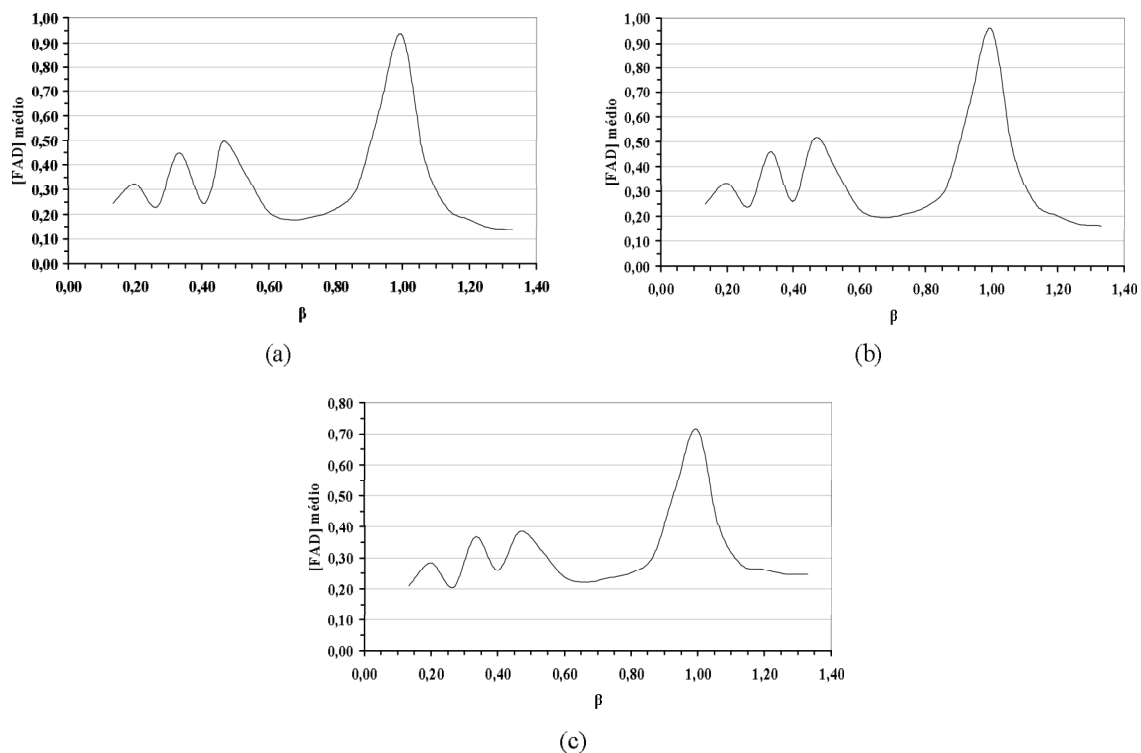


Figura 16. Espectro de resposta: modelo de veículo I; viga biapoiada sem balanços; (a) deslocamento: seção central, (b) momento fletor: seção central, (c) reação: apoio esquerdo

Analisando-se os espectros de resposta, observa-se que os mesmos apresentam trechos distintos, cada um encerrando uma região com efeitos acentuados correspondendo a valores do parâmetro de frequência indicativo de igualdade entre frequências da excitação e do sistema veículo-ponte. Desta forma, é interessante fazer uma análise mais minuciosa sobre estes espectros. Com este objetivo, pode-se dividi-los em dois segmentos distintos, a saber:

Segmento do 1º Pico: a frequência de carregamento, decorrente de uma sucessão de cargas, igualmente espaçadas e se deslocando sobre o tabuleiro com a mesma velocidade, aproxima-se da frequência da massa suspensa dos veículos.

Segmento do 2º Pico: para velocidades mais elevadas, constata-se, também, a existência de um segundo pico que surge quando a frequência de carregamento aproxima-se da frequência fundamental das obras de arte analisadas.

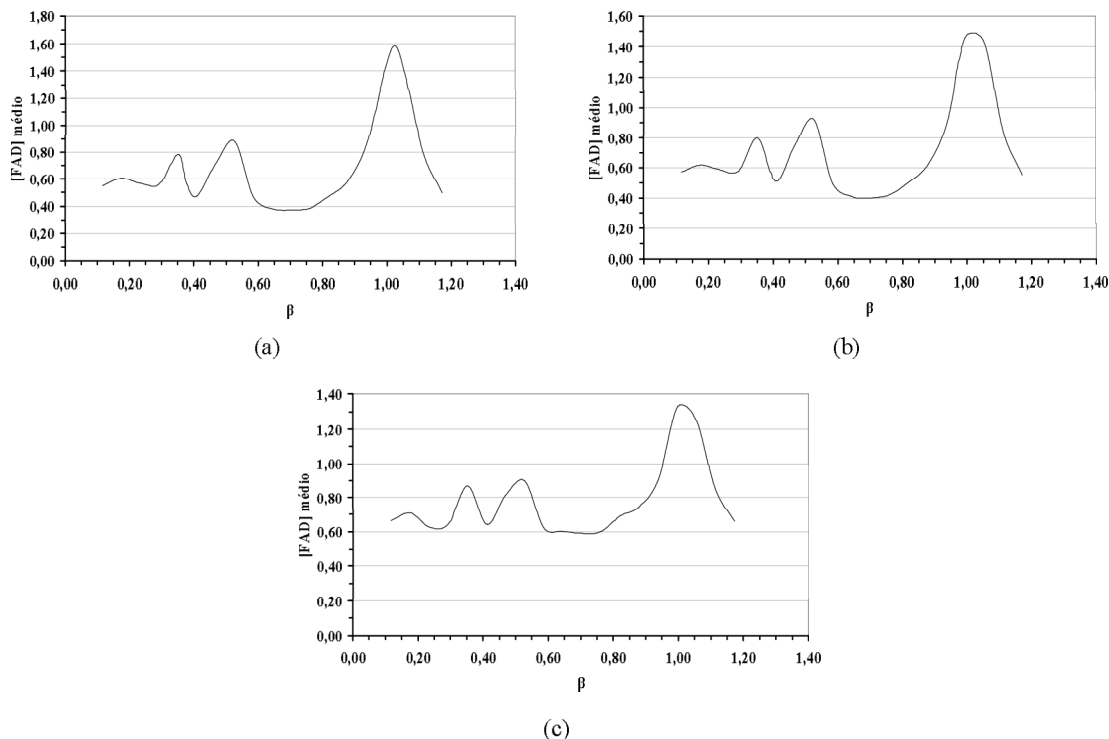


Figura 17. Espectro de resposta: modelo de veículo II; viga biapoiada sem balanços; (a) deslocamento: seção central, (b) momento fletor: seção central, (c) reação: apoio esquerdo

Foi observado também que existem outros picos de menor influência na resposta do sistema veículo-ponte, se comparados aos picos dos dois trechos descritos anteriormente. Tal fato é explicado, em regiões de velocidades mais elevadas, pela coincidência entre frequências múltiplas das frequências dos veículos e de frequências correspondentes a modos mais elevados das pontes rodoviárias.

Destaca-se que, de modo geral, para os veículos com apenas um eixo, a transferência de energia do sistema se dá com mais intensidade no trecho correspondente ao 2º pico dos gráficos, Figuras 16 e 17, correspondente à ressonância entre a frequência de carregamento do comboio e a frequência fundamental da ponte. O referido trecho é preponderante com relação aos demais trechos dos espectros de deslocamentos e esforços.

Ressalta-se que as amplificações máximas, provenientes do trecho do 2º pico dos espectros para a ponte em estudo, devidas exclusivamente ao efeito das irregularidades da pista com pavimentos de qualidade excelente, correspondem em torno de 70 % a 90 % dos efeitos máximos produzidos pela presença estática dos veículos, no que tange ao modelo de veículo com um eixo e uma massa. Já para o caso correspondente ao modelo de veículo com um eixo e duas massas, os efeitos são muito mais severos, em consonância com o trabalho de Silva^{3,4}, chegando mesmo a ultrapassar com boa margem os efeitos estáticos provenientes das viaturas do comboio.

Convém chamar a atenção do leitor, novamente, para o fato de que as ações dinâmicas provenientes das irregularidades superficiais representam parcela considerável na resposta do sistema veículo-ponte.

De modo geral, as amplificações máximas (trecho do 2º pico dos gráficos, Figuras 16 e 17) no sistema estrutural analisado ocorrem quando a velocidade dos veículos do comboio é da ordem de 160 km/h a 170 km/h, em ambos os casos. Assim sendo, a partir da definição do parâmetro de frequência, β , expresso pela relação $\nu/(l.f_{01})$, podem-se obter facilmente as velocidades de travessia críticas para qualquer sistema estrutural. Para tanto, é necessário que se atribua o valor unitário para β e com base na frequência fundamental da obra de arte, f_{01} , e do espaçamento entre estes, l , conhecidos a priori, pode-se obter a velocidade crítica, ν_c , associada aos efeitos máximos da resposta provenientes exclusivamente das irregularidades da pista.

Finalmente, ao observar-se a magnitude dos efeitos produzidos exclusivamente pelas irregularidades da pista, mostrados nas Figuras 16 e 17, sob a forma de espectros de resposta, pode-se concluir que o quadro apresentado é, então, muito sério; os efeitos dinâmicos provenientes das irregularidades do pavimento provocam, nos tabuleiros rodoviários, ações bastante amplificadas com relação àquelas consideradas correntemente em projeto. Vale citar que no Brasil, por deficiência de conservação das rodovias, as irregularidades existem em profusão.

A seguir, são apresentados e analisados, nas Figuras 18 e 19, os espectros de resposta obtidos para o tabuleiro biapoiado sem balanços quando submetido ao tráfego de comboios de veículos com dois e três eixos.

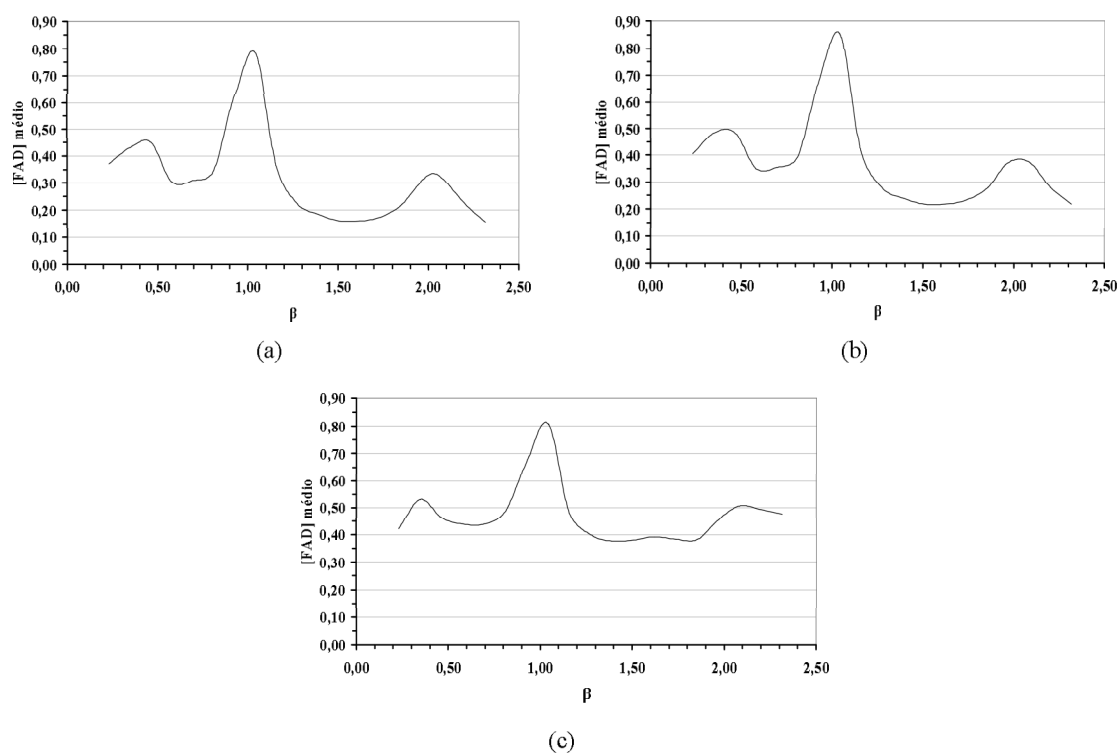


Figura 18. Espectro de resposta: modelo de veículo III; viga biapoiada sem balanços; (a) deslocamento: seção central, (b) momento fletor: seção central, (c) reação: apoio esquerdo

Observando-se as Figuras 18 e 19, observa-se que esses gráficos, da mesma forma como no caso anterior, Figuras 16 e 17, apresentam-se com regiões contendo efeitos dinâmicos bastante acentuados. Como explicado anteriormente, tal fato corresponde a valores do

parâmetro de frequência indicativo de igualdade entre frequências da excitação e do sistema veículo-ponte. Desta forma, é interessante proceder-se, novamente, a uma análise mais criteriosa sobre estes espectros. Com este objetivo, pode-se dividi-los em segmentos distintos, a saber:

Trechos do 1º Pico e do 2º Pico: neste caso, a frequência de carregamento, decorrente de uma sucessão de eixos, igualmente espaçados e deslocando-se sobre o tabuleiro com velocidade constante, aproxima-se das frequências correspondentes aos graus de liberdade translacional e rotacional associados à massa suspensa dos veículos. Esta situação ocorre, principalmente, para os veículos com três eixos, Figura 19.

Trecho do 3º Pico: Para velocidades mais elevadas, verifica-se, ainda, como já explicado anteriormente, a existência de um terceiro pico que surge quando a frequência de carregamento aproxima-se da frequência fundamental das obras-de-arte em estudo, tanto no caso dos veículos com dois eixos quanto na situação correspondente aos veículos com três eixos.

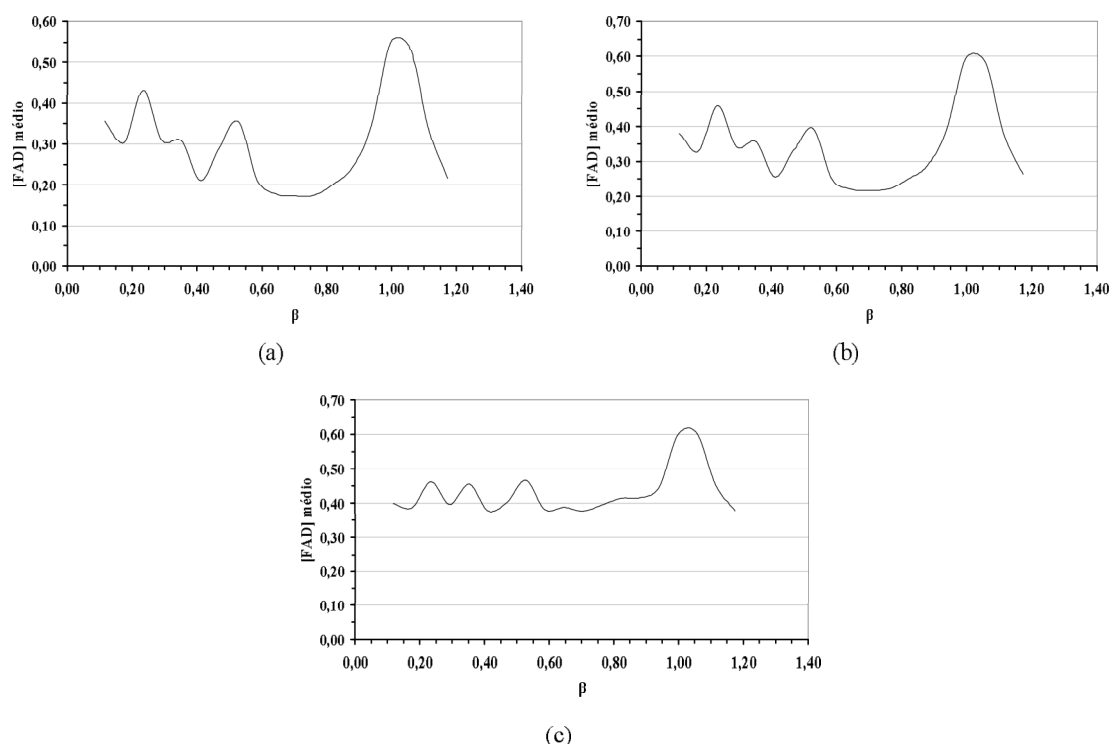


Figura 19. Espectro de resposta: modelo de veículo IV; viga biapoiada sem balanços; (a) deslocamento: seção central, (b) momento fletor: seção central, (c) reação: apoio esquerdo

O quadro, neste caso, é bastante similar à situação anterior (veículos com um eixo), onde verifica-se, novamente, que existem outros picos de menor influência na resposta do sistema veículo-ponte. Conforme já dito, tal fato é explicado, em regiões de velocidades mais elevadas, pela coincidência entre frequências múltiplas das frequências dos veículos e de frequências correspondentes a modos mais elevados das pontes rodoviárias, respectivamente.

Ressalta-se que para os veículos com dois eixos, a transferência de energia do sistema se dá com mais intensidade no trecho correspondente ao 1º pico dos gráficos, Figura 18, correspondente à ressonância entre a frequência de carregamento do comboio e da massa suspensa dos carros. O referido trecho é preponderante com relação aos demais trechos dos espectros de deslocamentos e esforços. Todavia, o mesmo não acontece para os veículos

com três eixos, já que neste caso a transferência de energia do sistema se dá com mais intensidade no trecho correspondente ao pico dos gráficos associado à ressonância entre a frequência de excitação do comboio e a frequência fundamental da obra de arte, Figura 19.

Destaca-se que os fatores de amplificação dinâmicos máximos (deslocamentos e esforços), para a obra de arte analisada, provenientes exclusivamente das irregularidades da pista de tabuleiros com pavimentos de qualidade excelente, correspondem em torno de 80 % dos efeitos máximos produzidos pela presença estática dos veículos, no que tange ao modelo de veículo com dois eixos e três massas. Na outra situação, associada ao modelo de veículo com três eixos e quatro massas, esses efeitos são da ordem de 60 % dos efeitos estáticos máximos provenientes dos veículos do comboio.

Novamente, percebe-se que as ações dinâmicas provenientes das irregularidades superficiais, mesmo aquelas de qualidade excelente, representam parcela significativa na resposta do sistema veículo-ponte.

Para o modelo de veículo com dois eixos, as amplificações máximas no sistema estrutural em estudo ocorrem quando a velocidade das viaturas do comboio é da ordem de 80 km/h. Para o modelo de veículo de com três eixos, a velocidade associada ao fator de amplificação máximo é da ordem de 150 km/h.

Observando-se a magnitude dos efeitos produzidos exclusivamente pelas irregularidades da pista, mostrados nas Figuras 18 e 19, é reforçada a conclusão de que os efeitos dinâmicos provenientes das irregularidades do pavimento provocam deslocamentos e esforços bastante amplificados nos tabuleiros rodoviários em relação àqueles considerados usualmente em projeto.

Viga Biapoiada Com Balanço: nas Figuras 20, 21, 22 e 23, são apresentados os espectros obtidos para este sistema estrutural, para os quatro modelos de veículos considerados, nas seções onde ocorrem os valores máximos.

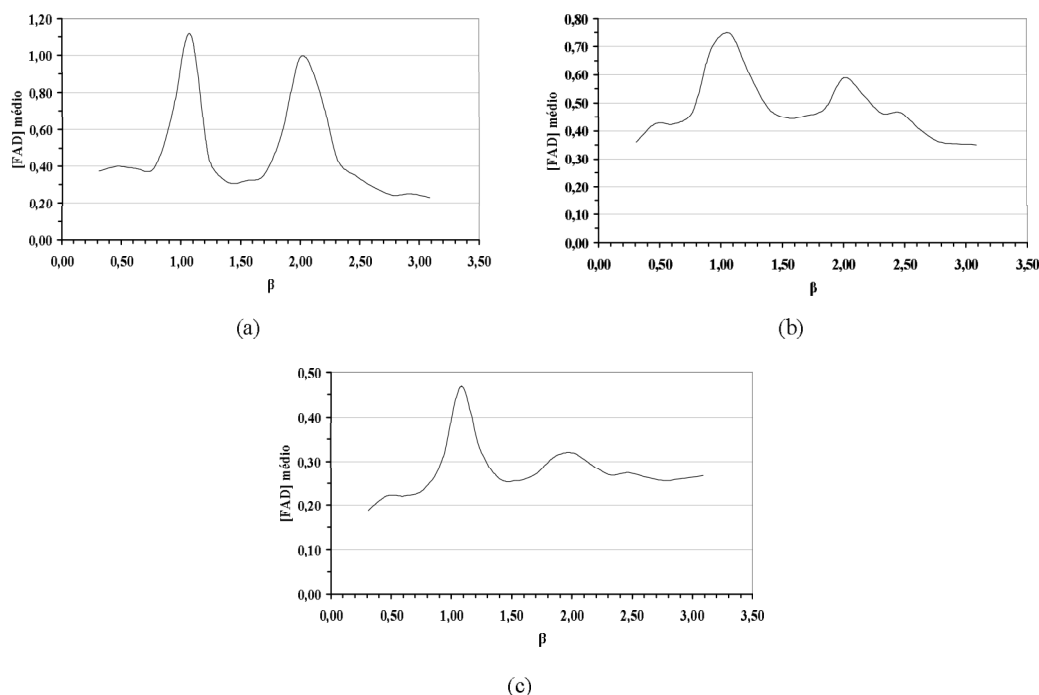


Figura 20. Espectro de resposta: modelo de veículo I; viga biapoiada com balanços; (a) deslocamento: extremidade do balanço esquerdo, (b) momento fletor: seção sobre o apoio esquerdo, (c) reação: apoio esquerdo

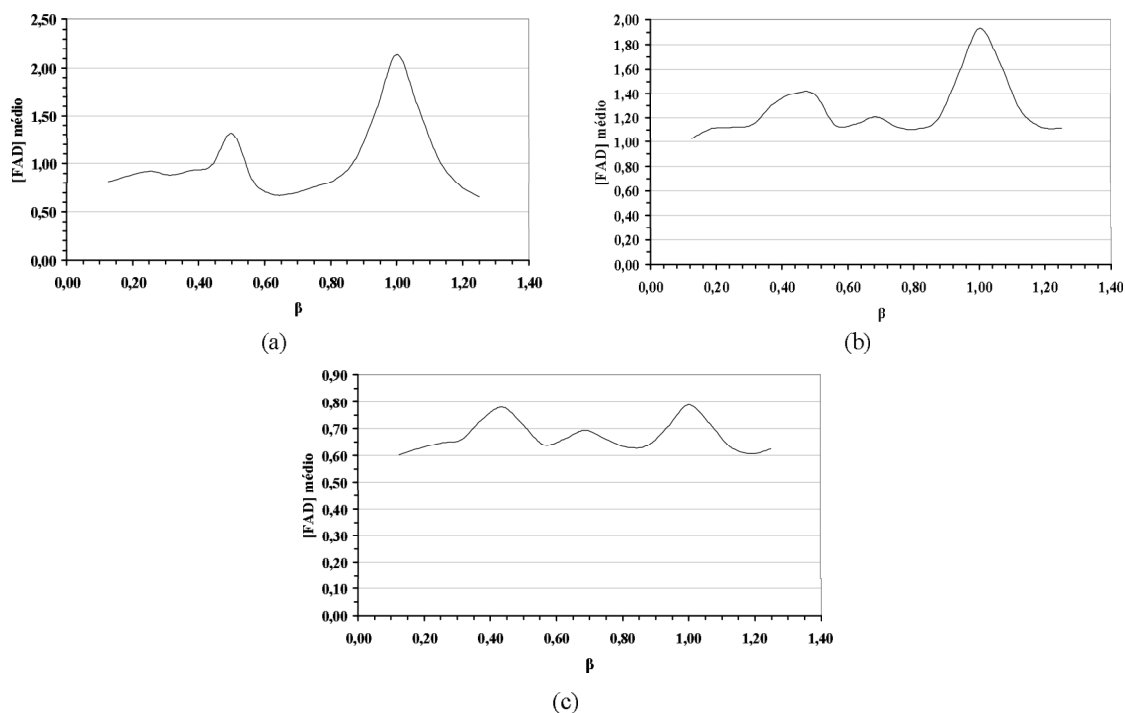


Figura 21. Espectro de resposta: modelo de ve\u00edculo II; viga biapoiada com balan\u00e7os; (a) deslocamento: extremidade do balan\u00e7o esquerdo, (b) momento fletor: se\u00e7\u00e3o sobre o apoio esquerdo, (c) rea\u00e7\u00e3o: apoio esquerdo

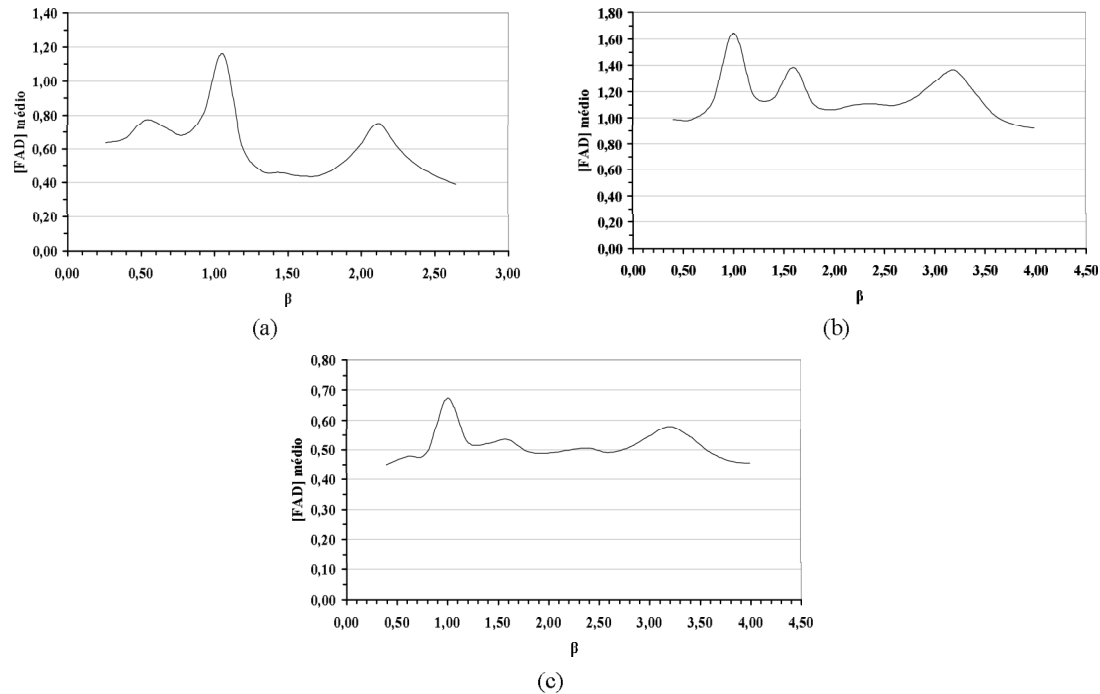


Figura 22. Espectro de resposta: modelo de ve\u00edculo III; viga biapoiada com balan\u00e7os; (a) deslocamento: extremidade do balan\u00e7o esquerdo, (b) momento fletor: se\u00e7\u00e3o sobre o apoio esquerdo, (c) rea\u00e7\u00e3o: apoio esquerdo

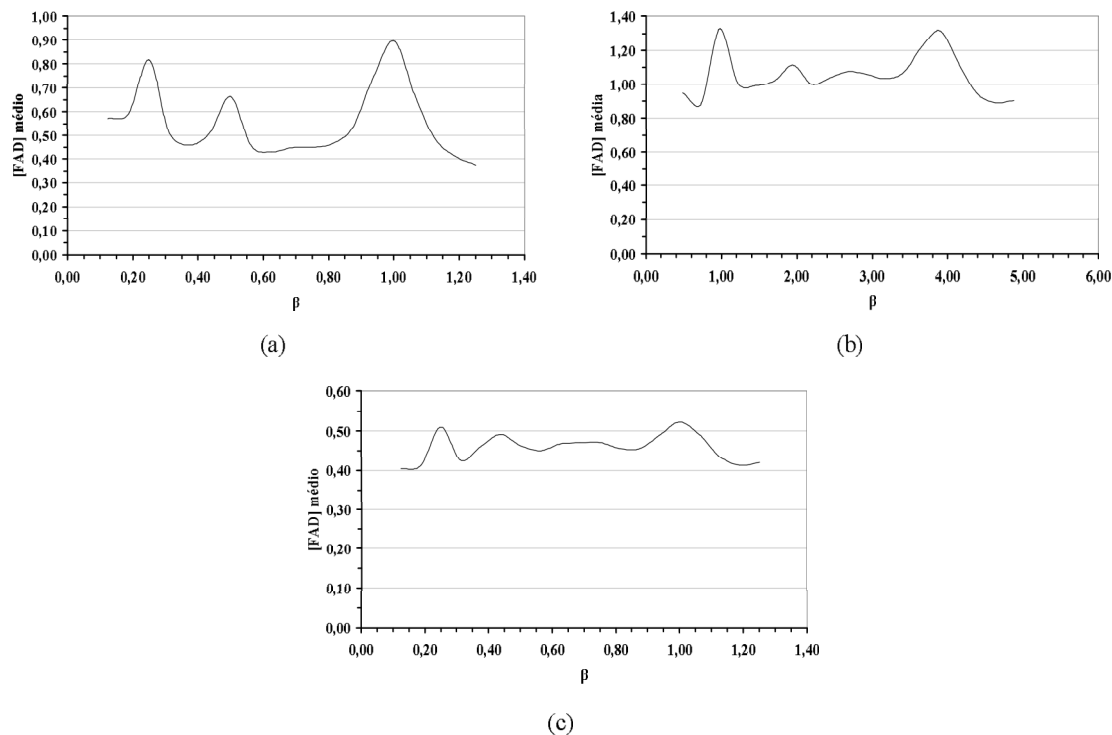


Figura 23. Espectro de resposta: modelo de veículo IV; viga biapoiada com balanços; (a) deslocamento: extremidade do balanço esquerdo, (b) momento fletor: seção sobre o apoio esquerdo, (c) reação: apoio esquerdo

Observando-se os resultados, deslocamentos e esforços, apresentados nas Figuras 20 a 23, no que tange aos aspectos qualitativos dos espectros de resposta, pode-se concluir que o quadro é rigorosamente o mesmo encontrado quando da análise da obra-de-arte biapoiada sem balanço. Assim sendo, procede-se a análise dos gráficos apenas no tocante aos aspectos quantitativos da resposta do sistema veículo-ponte, de forma a não repetir, demasiadamente, conclusões absolutamente similares.

Para o modelo de veículo I, as amplificações máximas no sistema em análise, viga biapoiada com balanços, ocorrem quando a velocidade dos carros é da ordem de 70 km/h. Com relação ao modelo com um eixo e duas massas, esta velocidade modifica-se para um valor em torno de 160 km/h.

O quadro repete-se com referência aos veículos com mais de um eixo. No caso dos carros com dois eixos e três massas, os efeitos dinâmicos máximos sobre o sistema estrutural ocorrem quando a velocidade das viaturas do comboio é da ordem de 70 km/h. Para o modelo de veículo de com três eixos e quatro massas, a velocidade associada ao fator de amplificação máximo é da ordem de 160 km/h.

Observando-se os valores das grandezas na resposta do sistema veículo-ponte (deslocamentos e esforços) correspondentes, principalmente, às seções do balanço, observa-se que os fatores de amplificação dinâmicos, provenientes exclusivamente das irregularidades da pista, superam os efeitos máximos produzidos pela presença estática dos veículos. Como exemplo, pode-se citar o $[FAD]_{\text{médio}} = 2,0$ para os deslocamentos verticais no extremo do balanço, associados ao modelo de veículo com um eixo e duas massas, Figura 21.

Tal situação ocorre em grande parte dos casos estudados referentes aos balanços, no que tange aos modelos de veículos desenvolvidos nesta dissertação, Figuras 20 a 23. Este fato

possui similaridade com referência à ponte anterior, viga biapoiada sem balanços, e indica que as seções dos balanços devem merecer atenção especial por parte dos projetistas desse tipo de estrutura.

Mais uma vez, observa-se, sem sombra de dúvidas, que as ações dinâmicas oriundas da interação existente entre as viaturas e o perfil irregular, mesmo aqueles de qualidade excelente, representam efeitos muito severos, principalmente para as seções dos balanços, das obras-de-arte rodoviárias.

Avaliação qualitativa e quantitativa dos modelos de veículos estudados

Um dos objetivos deste trabalho é o de propor e analisar a adequação de diversos tipos de modelos de veículos na análise dinâmica de pontes rodoviárias. Assim sendo, após a análise extensa acerca do comportamento geral do sistema veículo-ponte e, bem como, dos fatores de amplificação máximos médios, pode-se concluir, no que tange a modelagem dos veículos, que as viaturas com apenas um eixo e uma ou duas massas devem ser consideradas com muito cuidado, no que diz respeito à avaliação dos fatores de amplificação dinâmicos, pois estes modelos de veículos, como era de se esperar, magnificam a resposta dinâmica das obras-de-arte de forma exagerada, até pela própria natureza desse tipo de modelo, bastante simplificado.

Por outro lado, pode-se observar pelos resultados obtidos ao longo deste estudo que os veículos com dois e três eixos, representativos das viaturas existentes na norma brasileira de pontes⁸, induzem a fatores de amplificação dinâmicos, deslocamentos e esforços, mais suaves, especialmente o veículo com três eixos, diferentemente dos veículos com apenas um eixo, principalmente, no caso do modelo com um eixo e duas massas.

CONCLUSÕES

Convém chamar a atenção do leitor para o fato de que todos os modelos ensaiados são associados a vigas isostáticas de concreto armado, com e sem balanços, em seção caixão, submetidas à passagem de diversos comboios infinitos de veículos sobre a superfície irregular do tabuleiro. No que tange a questão qualitativa dos resultados, tais observações podem ser estendidas a outras combinações de dimensões. Quanto aos aspectos quantitativos, é possível uma extensão desde que acompanhada por criteriosa avaliação. Desta forma, tem-se que:

1. O modelo matemático adotado traduz de forma adequada o comportamento de pontes rodoviárias, submetidas ao tráfego de veículos sobre a superfície irregular do tabuleiro;
2. Os quatro modelos de veículos propostos representam a resposta dinâmica do sistema veículo-estrutura de maneira adequada;
3. A metodologia de análise desenvolvida para o cálculo da resposta do sistema veículo-ponte segundo análise no domínio do tempo com base em modelo estatístico apresenta-se coerente, no que tange a aspectos qualitativos e quantitativos da resposta, o que assegura confiabilidade aos resultados, conclusões e recomendações obtidos neste estudo;
4. Os fatores de amplificação dinâmicos máximos médios relativos a deslocamentos e esforços, devidos ao efeito da mobilidade da carga (somente efeito do peso das viaturas) não são muito elevados, sendo próximas da unidade. Porém, claramente constata-se que as ações provenientes das irregularidades da pista são substancialmente mais severas que as da mobilidade da carga, chegando mesmo a ultrapassar com boa margem as produzidas pela presença estática dos veículos;

5. Deve-se ressaltar, no tocante a modelagem dos veículos, que as viaturas com apenas um eixo e uma ou duas massas devem ser consideradas com muita cautela no que diz respeito à avaliação dos fatores de amplificação dinâmicos, pois estes modelos, como era de se esperar, amplificam a resposta dinâmica das obras-de-arte de forma exagerada, até pela própria natureza desse tipo de modelo, bastante simplificado;
6. Os veículos com dois eixos e três massas e três eixos e quatro massas, representativos das viaturas existentes na norma brasileira de pontes⁸, geram sobre as obras-de-arte de concreto armado fatores de amplificação dinâmicos, correspondentes a deslocamentos e esforços, mais suaves, especialmente o veículo com três eixos. Tal fato não ocorre quando se trata dos veículos com apenas um eixo, principalmente, no caso do modelo com um eixo e duas massas;
7. Com base no exposto anteriormente, propor recomendações de projeto para atender as solicitações dinâmicas oriundas do efeito das irregularidades superficiais seria totalmente anti-econômico e fora de propósito. Deste modo, este estudo permite recomendar, como solução absolutamente inadiável para o problema, a realização de uma conservação permanente, preventiva e, ainda, corretiva, assegurando superfícies de rolamento das obras-de-arte livres de “buracos”, “lombadas” e “costelas”.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, e ao Conselho Nacional de Pesquisa, CNPq, o auxílio financeiro para o desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 R.S. Almeida, “Análise de Vibrações de Pontes Rodoviárias Induzidas pelo Tráfego de Veículos sobre Pavimentos Irregulares”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGE CIV, Faculdade de Engenharia, FEN, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Orientador: Prof. José Guilherme Santos da Silva, Rio de Janeiro, Brasil, (2006).
- 2 R.S. Almeida e J.G.S. Silva, “A Stochastic Modeling of the Dynamical Response of Highway Bridge Decks under Traffic Loads”, ECCM 2006, III European Conference on Computational Mechanics. Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, Lisboa, p. 12, CD-ROM, (2006).
- 3 J.G.S. Silva, “Dynamical Performance of Highway Bridge Decks with Irregular Pavement Surface”, *Computer & Structures*, Vol. **82**, Nº 11-12, pp. 871-881, (2004).
- 4 J.G.S. Silva, “Análise Dinâmica Não-Determinística de Tabuleiros de Pontes Rodoviárias com Irregularidades Superficiais”, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Orientador: Prof. João Luís Pascal Roehl, Rio de Janeiro, Brasil, (1996).
- 5 L. Fryba, & M. Pirner, “Load Tests and Modal Analysis of Bridges”, *Engineering Structures*, Vol. **23**, pp. 102-109, (2001).
- 6 T.L. Wang, D. Huang, & M. Shahawy, “Dynamic Behavior of Slant-Legged Rigid Frame Highway Bridge”, *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol. **120**, Nº 3, pp. 885-902, (1994).
- 7 G. Sedlacek, St. Drosner, “*Dynamik bei Brücken*”, Institut für Stahlbau, RWTH Aachen, Mies van der Rohe Str. 1, 5100, Aachen, U. Braunschweig, University of Hannover, (1990).
- 8 ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre” - NBR 7188, (1984).

- 9 ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Projeto e Execução de Pontes de Concreto Armado e Protendido” - NBR 7187, (2003).
- 10 K.I.I. Ferreira, “Avaliação do Critério para Cálculo dos Efeitos das Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Orientador: Prof. João Luís Pascal Roehl, Rio de Janeiro, Brasil, (1991).
- 11 O.C. Zienkiewicz, “*The Finite Element Method in Engineering Science*”, McGraw-Hill, London, (1971).
- 12 H. Braun, “Untersuchungen Von Fahrbahnunebenheiten und Anwendungen der Ergebnisse”, Von der Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, (1969).
- 13 H. Braun, “Untersuchungen über Fahrbahnunebenheiten”, Deutsche Kraftfahrtforschung und Strassenverkehrstechnik, (1966).