

Influência da velocidade, do espaçamento e do número de veículos sobre a resposta dinâmica de pontes rodoviárias de concreto armado

Elvis D. Chantre Lopes · José G. Santos da Silva · Maria E. da Nóbrega Tavares

Recibido: Julio 2010, Aceptado: Agosto 2010

©Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España 2010

Resumo. Neste trabalho de pesquisa desenvolve-se um estudo paramétrico para análise da resposta dinâmica de pontes rodoviárias de concreto armado, devido à travessia de comboios de veículos sobre o pavimento irregular dessas obras-de-arte. O estudo é feito com base em uma metodologia de análise, no domínio do tempo, de acordo com um modelo estatístico. O modelo matemático empregado para simular o comportamento do sistema “veículo-ponte” considera a participação da massa e da rigidez das viaturas na definição das frequências do sistema e, conseqüentemente, a força de interação entre os veículos e a ponte é afetada pela flexibilidade desta. A ponte é modelada a partir do emprego de elementos finitos de barra unidimensionais e discretizado com massas concentradas e flexibilidade distribuída. O modelo de veículo empregado baseia-se no veículo TB-12 preconizado pela norma brasileira NBR 7188. Este veículo é simulado por sistemas de massas, molas e amortecedores sendo descrito por graus de liberdade à translação e rotação no plano. As irregularidades da pista são definidas por um modelo não-determinístico com base na densidade espectral do pavimento. O carregamento sobre a ponte é constituído por sucessões de veículos deslocando-se com velocidade constante sobre a obra. Devido à própria natureza das irregularidades da pista e do comboio de veículos, atenção especial é con-

centrada na fase permanente da resposta do sistema. São estudadas as respostas de dois modelos estruturais existentes, com base em tabuleiros isostáticos, em concreto armado, com e sem balanços, em seção do tipo “T” e duplo “T”, respectivamente, em termos de deslocamentos e esforços nas seções onde ocorrem os efeitos máximos. As conclusões do trabalho versam sobre a influência da velocidade, espaçamento e do número de veículos, referentes a situações distintas de carregamento, no que tange a resposta dinâmica das pontes rodoviárias de concreto armado. A magnitude dos efeitos dinâmicos associados à interação dos veículos com o pavimento irregular também é investigada.

INFLUENCE OF THE VELOCITY, SPACING AND NUMBER OF VEHICLES ON THE REINFORCED CONCRETE HIGHWAY BRIDGE DECKS DYNAMIC RESPONSE

Summary In this investigation a parametric study is developed in order to evaluate the reinforced concrete highway bridge decks dynamic response, due to vehicles crossing on the rough pavement surfaces. This study is made based on an analysis methodology, in time domain, considering a statistical approach. The mathematical model considered the participation of the mass and stiffness of the vehicles in the definition of the system natural frequencies. The “vehicle-bridge” mathematical model includes the interaction between the vehicles and bridge dynamical properties. The bridge deck was modelled using beam finite elements with concentrated masses and distributed stiffness. The vehicle model was based on the Brazilian code NBR 7188 standard vehicle TB-12. This vehicle was simulated as mass-spring-damper system and the degrees of freedom of these cars

E.D. Chantre Lopes · J.G. Santos da Silva ·
M.E. da Nóbrega Tavares
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
Centro de Tecnologia e Ciências (CTC)
Faculdade de Engenharia (FEN)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGE CIV)
Rua São Francisco Xavier, N0. 524, 50 Andar, Bloco A,
Sala 5016-A, CEP 20550-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Tel.: 55 21 23340469; e-mail: elvis.lopes@hotmail.com,
jgss@uerj.br, etavares@uerj.br

are defined as in plane vertical translations and rotations. The deck surface roughness was defined by a non-deterministic model based on the spectral density of the pavement. The moving load is formed by an infinite succession of vehicles equally spaced and with constant velocity. Only the steady-state response was considered. The dynamic response of two existing structural models corresponding to reinforced concrete highway bridge decks was investigated in terms of displacements and efforts. The conclusions have shown the influence of the velocity, spacing and number of vehicles on the reinforced concrete highway bridge decks dynamic response. The magnitude of the dynamic effects was investigated when the interaction between the vehicle's wheels and the irregular pavement surface was considered.

1. Introdução

No universo da engenharia estrutural, as pontes são estruturas suscetíveis a problemas dinâmicos, produzidos essencialmente pela movimentação dos veículos sobre o tabuleiro e pela ação do vento. As ações oriundas da travessia dos veículos sobre o tabuleiro das obras de arte são originadas da interação entre os sistemas mecânicos destes veículos e do sistema estrutural. Atualmente, tem-se o conhecimento de que as amplificações dinâmicas decorrentes da interação entre os pneus dos veículos e a superfície irregular do tabuleiro das pontes pode vir a causar uma série de danos estruturais, tais como fissuras em estruturas de concreto ou mesmo fraturas por fadiga em estruturas de aço e mistas (aço-concreto) Lopes [1], Amorim [2], Melo [3], Almeida [4], Silva [5,6].

Assim sendo, desde longa data, sabedores da absoluta importância do assunto, diversos pesquisadores, Lopes [1], Amorim [2], Melo [3], Almeida [4], Silva [5,6], têm desenvolvido esforços contínuos objetivando avaliar este problema, com base no desenvolvimento de diversos estudos, considerando inclusive os efeitos oriundos da superfície irregular do pavimento. Em síntese, busca-se um critério conveniente para cálculo dos esforços e deslocamentos nos tabuleiros das pontes rodoviárias.

Em projetos de pontes rodoviárias, as consequências desses efeitos dinâmicos têm sido geralmente consideradas através de um coeficiente de impacto, que é determinado, na maioria dos regulamentos, inclusive no brasileiro ABNT [7,8], exclusivamente com base no vão da estrutura, sendo aplicado às condições estáticas de projeto e ignora todos os outros fatores da rigidez, do amortecimento e da massa de uma estrutura. Contudo, tem-se observado que algumas pontes podem atingir um nível de vibração, sob condições de tráfego corren-

te, que as tornam inaceitáveis por comprometerem as condições de serviço e a durabilidade da obra.

Assim sendo, esta investigação propõe um procedimento de análise mais elaborado, no que tange aos elementos que contribuem de forma significativa para a resposta dinâmica das pontes (veículos, sistema estrutural e irregularidades da pista). Um estudo paramétrico é desenvolvido para análise da resposta dinâmica de tabuleiros rodoviários de concreto armado, devido à travessia de comboios de veículos sobre o pavimento irregular dessas obras de arte. A análise paramétrica tem por objetivo avaliar a influência da velocidade, do espaçamento e do número de veículos sobre a resposta dinâmica destas pontes, em termos de deslocamentos e esforços.

2. 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.

2.1. Tabuleiro rodoviário

O tabuleiro das pontes é modelado utilizando-se elementos finitos de viga, de acordo com a formulação do Método dos Elementos Finitos [9] (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 Figura 1 apresenta um modelo genérico de uma ponte simplesmente apoiada discretizada por n elementos finitos de viga, com $n-1$ massas concentradas.

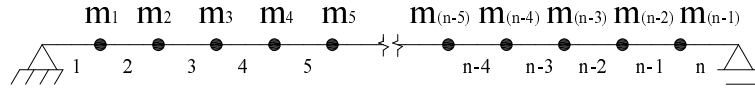


Figura 1. Modelo de uma ponte biapoiada com sua massa discretizada nos nós

2.2. Modelos dos veículos

O modelo matemático do veículo desenvolvido neste trabalho procura representar veículos reais que trafegam sobre as pontes rodoviárias e viadutos existentes. Este modelo é considerado discreto, bidimensional e constituído por conjuntos de massas, molas e amortecedores. Para esta investigação emprega-se um modelo de veículo com quatro graus de liberdade.

O modelo do veículo é formado por um conjunto de massas, molas e amortecedores e baseia-se no veículo “Tipo 12” preconizado pela norma brasileira NBR 7188 ABNT [7], como mostrado na Figura 2. 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 matemático apresentado na Figura 2 possui dois eixos, uma massa suspensa e duas massas não-suspensas. A massa suspensa, m_s , representa o chassi e a carroceria do veículo e as massas não-suspensas, m_{ns1} e m_{ns2} , simulam os pneus, rodas e eixos. O conjunto de molas e amortecedores superiores, k_{vs1} , c_{vs1} e k_{vs2} , c_{vs2} , representam, respectivamente, a rigidez e o amortecimento da suspensão. Um segundo conjunto de molas e amortecedores inferiores, k_{vp1} , c_{vp1} e k_{vp2} , c_{vp2} , simula, respectivamente, a rigidez e o amortecimento dos pneus do veículo, conforme ilustrado na Figura 2.

Nesta investigação, as propriedades dinâmicas utilizadas para os veículos foram as seguintes, a saber: $m_s=10667$ kg, $m_{ns1} = m_{ns2}=666,5$ kg, o que corresponde a um peso total de 120kN, $k_{vs1} = k_{vs2}=2480$ kN/m e $k_{vp1} = k_{vp2}=8046$ kN/m. Os coeficientes de amortecimento destes veículos são obtidos a partir da fração de amortecimento da suspensão ($\xi_s=0,10$ ou 10 %).

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, referentes às viaturas, as

quais escritas na forma matricial são dadas por:

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{ns1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{ns2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_v \\ \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{\theta}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{vs1} + c_{vs2} & -c_{vs1} & -c_{vs2} & (-c_{vs1} + c_{vs2}) d \\ -c_{vs1} & c_{vs1} + c_{vp1} & 0 & c_{vs1} d \\ -c_{vs2} & 0 & c_{vs2} + c_{vp2} & -c_{vs2} d \\ (-c_{vs1} + c_{vs2}) d & c_{vs1} d & -c_{vs2} d & (c_{vs1} + c_{vs2}) d^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_v \\ \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{\theta}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{vs1} + k_{vs2} & -k_{vs1} & -k_{vs2} & (-k_{vs1} + k_{vs2}) d \\ -k_{vs1} & k_{vs1} + k_{vp1} & 0 & k_{vs1} d \\ -k_{vs2} & 0 & k_{vs2} + k_{vp2} & -k_{vs2} d \\ (-k_{vs1} + k_{vs2}) d & k_{vs1} d & -k_{vs2} d & (k_{vs1} + k_{vs2}) d^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_v \\ u_1 \\ u_2 \\ \theta_v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

2.3. 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 3, é definida pela equação:

$$v_b(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} v_b(\omega) e^{(i\omega)x} d\omega \quad (2)$$

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:

$$E[v_b^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{v_b v_b}(\omega) d\omega \quad (3)$$

Como modelo matemático, adota-se para representação da densidade espectral das irregularidades da pista uma função exponencial que tem sido utilizada por diversos pesquisadores Lopes [1], Amorim [2], Almeida

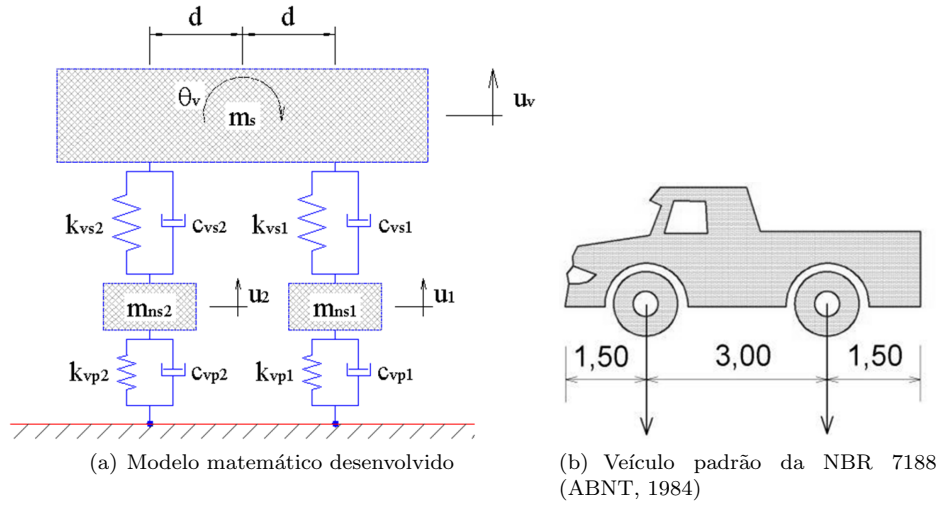


Figura 2. Modelo matemático do veículo

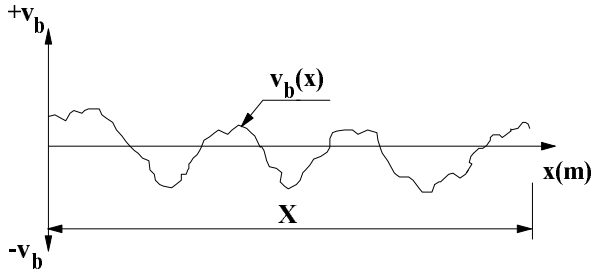


Figura 3. Função de irregularidade não-determinística

[4], Silva [5,6], Wang *et al.* [10], e Dods & Robson [11], dada pela equação:

$$\Phi_{v_b v_b}(\omega) = \Phi(\omega_0) \left[\frac{\omega}{\omega_0} \right]^{-w} \quad (4)$$

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

Para avaliação dos parâmetros que descrevem a densidade espectral das irregularidades, Eq.(4), 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, Lopes [1], Amorim [2], Almeida [4], Silva [5,6], Wang *et al.* [10] e Sedlacek & Drosner [14].

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 Eq.(5)

$$v_b(x) = \sum_{i=1}^N v_{bi} \cos[\omega_i x - \varphi_i] \quad (5)$$

onde v_{bi} é a amplitude real da parte harmônica; ω_i a frequência do harmônico i ; φ_i o ângulo de fase do harmônico i ; e N o 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:

$$v_{bi} = \sqrt{2\Delta\omega \Phi_{v_b v_b}(\omega_i)} \quad (6)$$

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. Em seguida, a Figura 4 apresenta exemplos referentes a perfis de irregularidades geradas com base no modelo matemático proposto, para pistas de qualidade ruim, média e excelente. No eixo das abscissas encontram-se os valores de amplitudes das irregularidades, em milímetros, e no das ordenadas, as coordenadas longitudinais do eixo da ponte metros. O trecho apresentado representa um metro de pista, genericamente, em uma escala tal que ressalte as amplitudes das irregularidades para cada qualidade de pista considerada (Figura 4).

2.4. Sistema veículo-ponte

O veículo 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

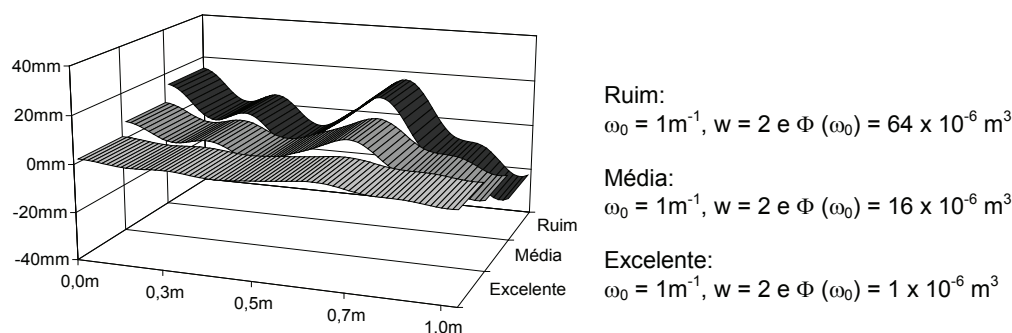


Figura 4. Exemplos de amostras de irregularidades superficiais do pavimento

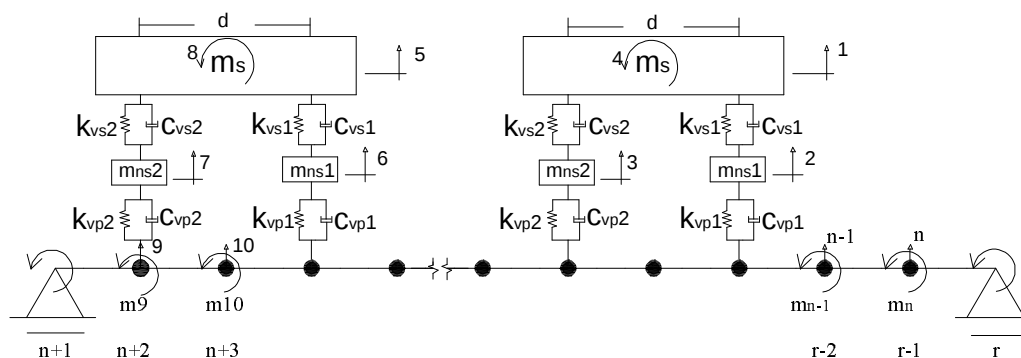


Figura 5. Sistema veículo-ponte

para os veículos do comboio. A Figura 5 apresenta uma representação esquemática do sistema veículo-ponte (ou sistema veículo-viga),

Nesta investigação, 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. Os pontos de apoio são rígidos, a seção transversal da viga é do tipo duplo “T”, e o momento de inércia da seção transversal, em relação à linha neutra, pode variar ao longo do comprimento do tabuleiro.

Divide-se a viga em elementos finitos e sua massa é concentrada nos nós. O processo de concentração das massas consiste na adição dos valores correspondentes às metades das massas dos elementos convergentes aos nós. Os pontos de apoio não recebem massas. Os nós rotulados são pontos de concentração de massa em virtude do elemento adotado para discretizar a viga.

Inicialmente, 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 destes serem elementos móveis, a cada nova posição dessas viaturas o sistema é modificado, induzindo, conseqüentemente, alterações na equação de movimento, mais especificamente nos ele-

mentos 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 [5,6].

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 regular entre os veículos considerado como sendo igual a um múltiplo do comprimento de um elemento finito de barra, de acordo com o caso de carregamento atuante sobre a obra de arte. Ressalta-se que as matrizes do sistema veículo-ponte permanecem inalteradas após o tabuleiro estar completamente ca-

rregado. 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 [5,6].

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 [5,6].

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.

A partir dessas considerações, escreve-se o vetor de cargas, $F(t)$, referente à interação dos pneus dos veículos com a superfície irregular do tabuleiro, representando forças dinâmicas aplicadas nas coordenadas desses carros.

$$F(t) = C_v e \dot{v}_b + K_v e v_b \quad (7)$$

onde C_v é a matriz de amortecimento para cada modelo distinto de veículo; K_v a matriz de rigidez para cada modelo distinto de veículo; e o vetor unitário definido para aplicação das forças dinâmicas nas coordenadas dos carros; v_b a grandeza associada ao perfil irregular do pavimento e $\dot{v}_b$ a primeira derivada de v_b .

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:

$$r = \frac{f_v}{l^3} \begin{Bmatrix} l^3 - 3a^2l + 2a^3 \\ (l^2 - 2al + a^2)al \\ (3l - 2a)a^2 \\ (a - l)a^2l \end{Bmatrix} \quad (8)$$

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

3. 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, ν . 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, $f_c = \nu/l$, associada ao movimento desses veículos sobre o tabuleiro, conforme ilustrado de forma genérica pela Figura 6.

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 [5,6].

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 influência da velocidade, do espaçamento e do número de veículos sobre a resposta dinâmica de pontes rodoviárias de concreto armado (deslocamentos e esforços). Evidentemente, 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 serão devidamente avaliados.

As pontes analisadas neste trabalho são de concreto armado, com seção do tipo “T” e duplo “T”, com tabuleiro apoiado sobre longarinas e inércia variável ao longo do seu comprimento como ilustradas nas Figuras 7 e 8 (Modelo Estrutural I - ME-I), Figuras 9 e 10 (Modelo Estrutural II - ME-II). Este sistema representa grande parte das obras de arte em concreto armado nas rodovias federais na faixa de vãos entre 10m a 40m. As características dos modelos estruturais são mostradas nas Tabelas 1 e 2.

Neste trabalho, consideram-se dois sistemas estruturais para o tabuleiro da obra-de-arte: biapoiado com

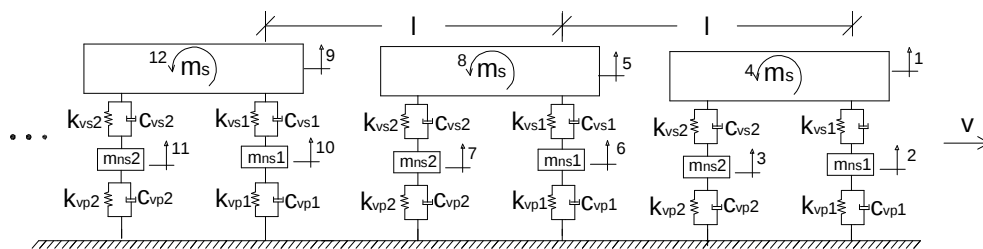


Figura 6. Representação genérica do comboio infinito de veículos

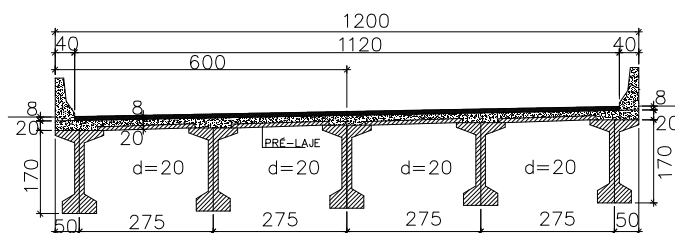


Figura 7. Corte transversal do viaduto: Modelo Estrutural I (unidades em cm)

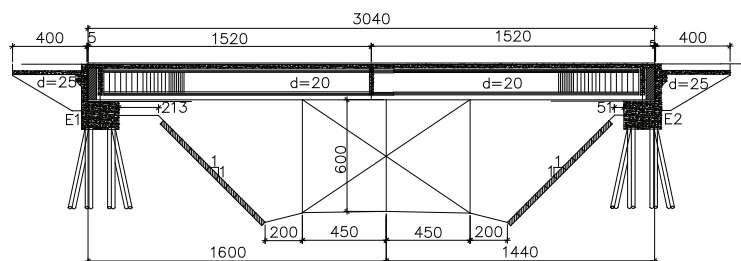


Figura 8. Corte longitudinal do viaduto - Modelo Estrutural I (unidades em cm)

e sem balanços. No sistema sem balanço (Modelo estrutural I - ME-I) o vão é de 30,0 m, e no com balanço (Modelo estrutural II - ME-II) o vão é de 24,0 m e os dois balanços de 6,0 m, cada um.

Um ponto importante neste estudo diz respeito aos valores das frequências naturais dos veículos isolados, considerados para efeito de análise sobre uma base rígida. As frequências naturais, correspondentes à translação da massa suspensa e da massa não-suspensa, são feitas iguais a 3,0 Hz e 20,0 Hz, respectivamente, Silva [5,6]. Contudo, o veículo possui uma frequência de valor mais baixo, associada à rotação da massa não-suspensa dos modelos, a qual é igual a 2,3 Hz, Figura 2.

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 [5,6]. A massa total de todos os modelos de veículo empregados neste trabalho é de 12 t ($m_s = 10667$ kg; $m_{ns1} = 666,5$ kg e $m_{ns2} = 666,5$ kg), o que corresponde a um peso total de 120 kN. A relação entre a massa suspensa e as massas não-suspensas foi feita igual a 8,0 em todos os casos, Silva [5,6].

Para cada qualidade de 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 efeitos estáticos máximos obtidos para cada seção da 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, eqs. (2) a (6). 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 Lopes [1], Amorim [2], Almeida [4], Silva [5,6], Wang *et al.* [10], e Dods & Robson [11].

4.1. 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,

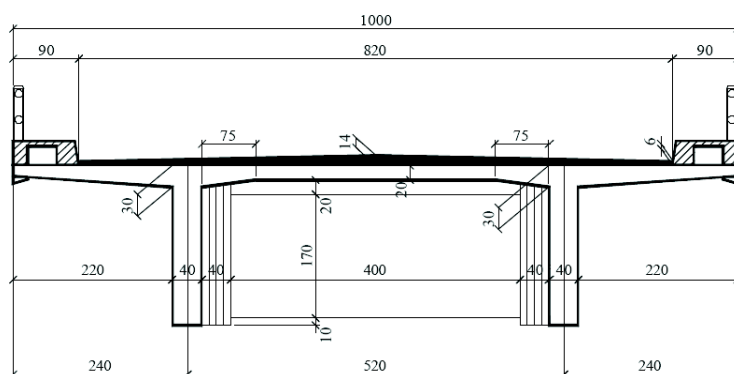


Figura 9. Corte transversal da ponte: Modelo Estrutural II (unidades em cm)

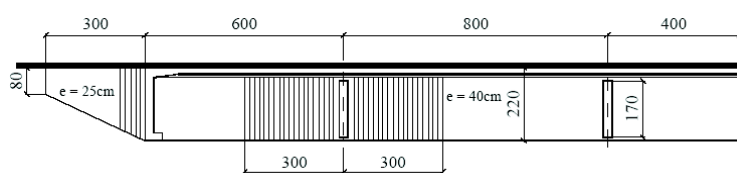


Figura 10. Corte longitudinal da ponte: Modelo Estrutural II (unidades em cm)

Tabela 1. Características do tabuleiro - Modelo Estrutural I

Grandeza	Valor Adotado	Unidade
Area da seção transversal (A)	5,61	m^2
Massa específica (ρ)	2500	kg/m^3
Massa distribuída ($\bar{m}$)	14025	kg/m
Momento de inércia (J)	2,4698	m^4
Módulo de elasticidade (E)	$2,82 \times 10^7$	kN/m^2
Fração de amortecimento (ξ_1)	0,03	-
Frequência fundamental (f_{01}): ponte descarregada	3,90	Hz
Frequência fundamental (f_{01}): ponte carregada	4,15	Hz

Tabela 2. Características do tabuleiro - Modelo Estrutural II

Grandeza	Valor Adotado	Unidade
Area da seção transversal (A)	3,74	m^2
Massa específica (ρ)	2500	kg/m^3
Massa distribuída ($\bar{m}$)	9350	kg/m
Momento de inércia (J)	1,2550	m^4
Módulo de elasticidade (E)	$2,50 \times 10^7$	kN/m^2
Fração de amortecimento (ξ_1)	0,03	-
Frequência fundamental (f_{01}): ponte descarregada	4,50	Hz
Frequência fundamental (f_{01}): ponte carregada	4,75	Hz

devidos à simulação da passagem de comboios de veículos sobre o tabuleiro com pavimento irregular.

Assim sendo, as Figuras 11 a 16 apresentam no eixo das ordenadas o fator de amplificação dinâmico, FAD, definido pela relação entre o valor do efeito dinâmico (esforços e deslocamentos) e o correspondente efeito estático máximo na seção do sistema estrutural considerada na análise, ao longo do tempo. No eixo das abscissas essas figuras ilustram a relação t/t_1 , na qual

a variável t representa o tempo de análise e t_1 corresponde ao tempo de travessia de um veículo do comboio.

A resposta dinâmica da ponte em estudo, ilustrada pelas Figuras 11 a 16, foi obtida com base no emprego de comboios de 2 veículos com espaçamento de 10,5m ($l=10,5m$) e 5 veículos espaçados de 7,5m ($l=7,5m$) (Figura 6), ambos do tipo TB-12 ABNT [7], trafegando sobre o tabuleiro irregular. Vale ressaltar que o momento fletor positivo e o deslocamento translacional vertical

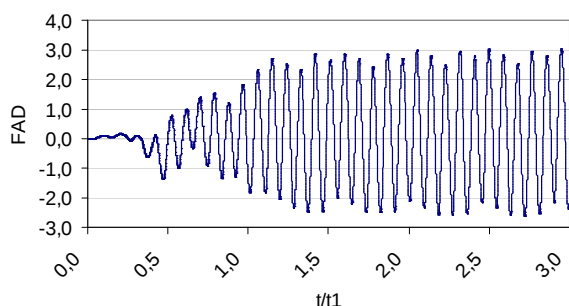


Figura 11. Deslocamento na seção central do ME-I para o comboio de 2 veículos TB-12

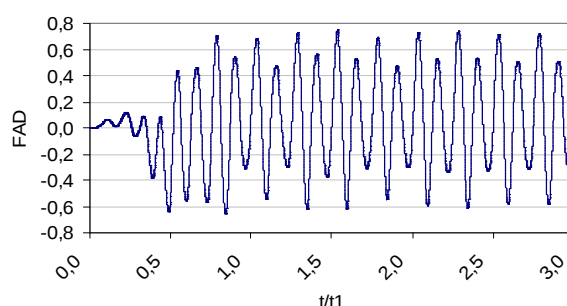


Figura 12. Deslocamento na seção central do ME-I para o comboio de 5 veículos TB-12

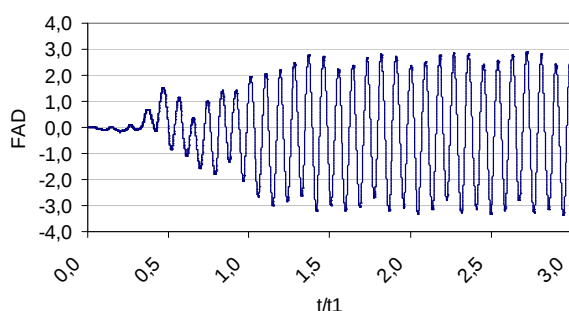


Figura 13. Momento fletor positivo na seção central do ME-I para o comboio de 2 veículos TB-12

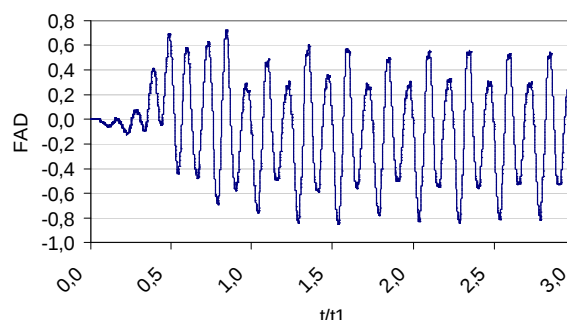


Figura 14. Momento fletor positivo na seção central do ME-I para o Comboio de 5 veículos TB-12

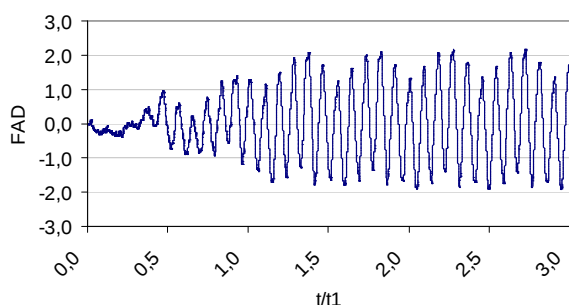


Figura 15. Esforço cortante na seção do apoio esquerdo do ME-I para o comboio de 2 veículos TB-12

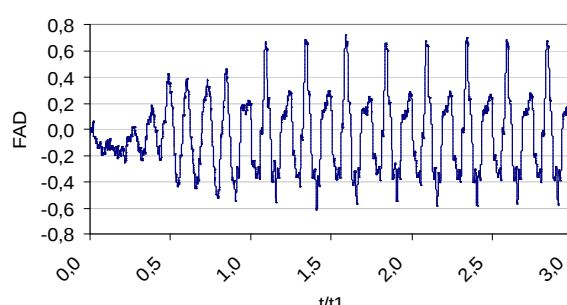


Figura 16. Esforço cortante na seção do apoio esquerdo do ME-I para o comboio de 5 veículos TB-12

apresentam valores máximos no meio do vão central da ponte e o esforço cortante possui esses máximos sobre o apoio esquerdo do modelo, Figuras 11 a 16.

4.1.1. Ponte simplesmente apoiada - ME-I

Nas Figuras 11 a 16, são apresentados os gráficos do comportamento geral da estrutura, ao longo do tempo, referentes exclusivamente às ações dinâmicas oriundas das irregularidades superficiais do pavimento, para as seções correspondentes aos efeitos máximos. As análises aqui apresentadas foram feitas com base no emprego do modelo estrutural ME-I (ponte simplesmente apoiada), com base no emprego de comboios com 2 e 5 veículos. Para o caso do tráfego do comboio com dois veículos

foi constatado que este gerou as maiores amplificações dinâmicas, ao longo da análise, para este modelo estrutural. Por outro lado, o comboio com cinco veículos representa o número máximo de carros que podem trafegar sobre a ponte.

Observando-se as Figuras 11 a 16, percebe-se que os níveis das amplificações são bastante elevados, no que tange ao efeito dinâmico produzido pela interação dos pneus dos veículos do comboio com uma amostra de irregularidade representativa de um pavimento de qualidade excelente. Ressalta-se, ainda, que as ações devidas às irregularidades da pista são muito mais severas que as oriundas da mobilidade da carga, chegando mesmo a ultrapassar com boa margem aos efeitos produzidos pela presença estática dos veículos.

Os valores máximos da resposta do sistema veículo-ponte ocorrem na fase permanente dos gráficos, onde se observa a repetição desses valores extremos, ao longo do tempo. Considerando-se as Figuras 11, 13 e 15, verifica-se a predominância de um período de vibração aproximadamente igual a 0,45s ($T_0 = 0,45$ s: comboio com dois veículos, velocidade de 80km/h e espaçamento de 10,5m). Este período de vibração está associado à frequência de travessia dos veículos ($f_t = 1/T_0$), com valor igual a 2,22Hz ($f_t = 2,22$ Hz).

A frequência de 2,22Hz ($f_t = 2,22$ Hz) diz respeito, praticamente, ao valor da primeira frequência natural do sistema veículo-ponte, $f_{01} = 2,30$ Hz (frequência associada à rotação da massa não suspensa dos veículos), indicando que este comboio em particular provoca ressonância, no que tange frequência fundamental do sistema veículo-viga ($f_t = f_{01}$). Sob essas condições, o tabuleiro atinge uma situação em que predomina a fase permanente da resposta, com repetições de valores extremos, de interesse direto para uma análise de fadiga do material.

No que tange as Figuras 12, 14 e 16, observa-se uma nítida predominância de um período de 0,54s ($T_0 = 0,54$ s), associado a uma frequência de travessia dos veículos (ou de excitação) igual a 1,85Hz ($f_t = 1,85$ Hz). Este período de 0,54s correspondente ao tempo de travessia entre dois veículos subseqüentes do comboio, ou seja: $T_0 = l/v$, onde l representa o espaçamento entre veículos subseqüentes do comboio, neste caso 7,5m e v corresponde a velocidade dos veículos (50km/h). Neste caso, pode-se observar que esta frequência não está associada a nenhuma frequência natural do sistema veículo-ponte, não resultando, portanto, em uma situação de ressonância.

Nesta análise o valor máximo encontrado para o FAD dos deslocamentos translacionais verticais foi da ordem de 3,0 (seção do meio do vão) (Figura 11). Para os momentos fletores este valor foi igual a 3,0 (seção do meio do vão) (Figura 13). No que diz respeito aos esforços cortantes máximos médios o valor máximo do FAD foi da ordem de 2,2 (seção do apoio esquerdo) (Figura 15).

4.1.2. Ponte simplesmente apoiada com balanços - ME-II

Nas Figuras 17 a 26, são apresentados os gráficos do comportamento geral da ponte, ao longo do tempo, no que tange aos efeitos dinâmicos oriundos exclusivamente das irregularidades da pista, para as seções dos efeitos máximos. As análises foram feitas com base no emprego do modelo estrutural ME-II (ponte simplesmente apoiada com balanços), utilizando-se comboios com 3 e 6 veículos, ambos com espaçamento entre as viaturas igual a 7,5m ($l = 7,5$ m, Figura 6). Para o caso

do tráfego do comboio com três veículos foi constatado que este gerou as maiores amplificações dinâmicas para esta obra de arte, ao longo da análise, e o comboio com seis veículos representa o número máximo de carros que podem trafegar sobre a obra de arte.

Considerando-se as Figuras 17, 19, 21, 23 e 25, constatou-se que a predominância de um período de vibração é aproximadamente igual a 0,33s ($T_0 = 0,33$ s: comboio com três veículos, velocidade de 80km/h e espaçamento de 7,5m). Este período de vibração está associado à frequência de travessia dos veículos ($f_t = 1/T_0$), com valor igual a 3,0Hz ($f_t = 3,0$ Hz).

A frequência de 3,0Hz ($f_t = 3,0$ Hz), correspondente à frequência de translação da massa suspensa, $f_{02} = 3,0$ Hz, indicando que este comboio em particular provoca ressonância, no que tange a frequência fundamental do sistema veículo-viga ($f_t = f_{02}$). Sob essas condições, o tabuleiro atinge uma situação em que predomina a fase permanente da resposta, com repetições de valores extremos, de interesse direto para uma análise de fadiga do material.

Em relação às Figuras 18, 20, 22, 24, 26, observa-se a predominância de um período de 0,64s ($T_0 = 0,64$ s), associado a uma frequência de travessia dos veículos (ou de excitação) igual a 1,56Hz ($f_t = 1,56$ Hz). Este período de 0,64s correspondente ao tempo de travessia entre dois veículos subseqüentes do comboio, ou seja: $T_0 = l/v$, onde l representa o espaçamento entre veículos subseqüentes do comboio, neste caso 7,5m, e v corresponde a velocidade dos veículos (40km/h). Pode-se observar que esta frequência não está associada a nenhuma frequência natural do sistema veículo-ponte, logo, não há situação de ressonância.

Nesta análise, o valor máximo encontrado para o FAD correspondente aos deslocamentos translacionais verticais foi da ordem de 3,0 (seção do meio do vão) (Figura 17), e de 3,2 para a seção da extremidade do balanço (Figura 19). Para os momentos fletores positivos este valor foi igual a 3,0 (seção do meio do vão) (Figura 21), e de 1,3 para os momentos fletores negativos (do apoio esquerdo) (Figura 23). No que diz respeito aos esforços cortantes máximos médios o valor máximo do FAD foi da ordem de 1,1 (seção do apoio esquerdo) (Figura 25).

4.2. Efeito da variação da velocidade e do espaçamento entre os veículos

A seguir, são apresentados os gráficos pertinentes as análises dinâmicas realizadas neste estudo, onde objetiva-se verificar a influência da velocidade e do espaçamento entre veículos dos comboios. Para tal, são utilizados, novamente, os modelos estruturais (ME-I e ME-II).

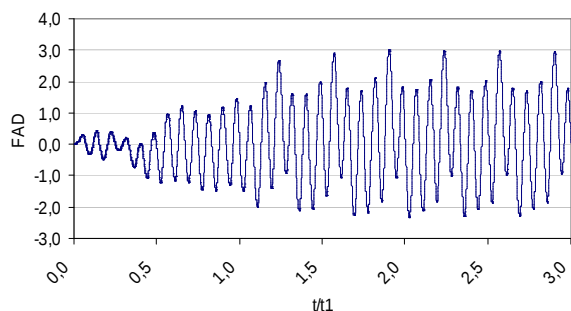


Figura 17. Deslocamento na seção central do ME-II para o comboio de 3 veículos TB-12

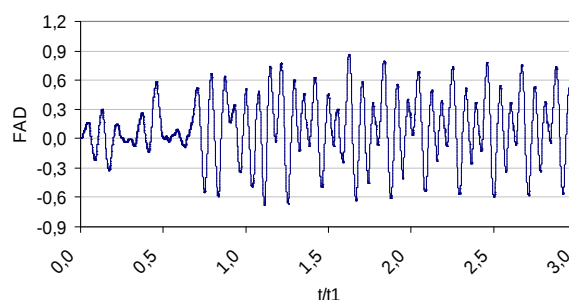


Figura 18. Deslocamento na seção central do ME-II para o comboio de 6 veículos TB-12

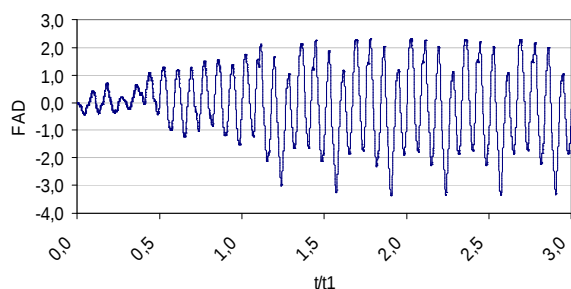


Figura 19. Deslocamento na extremidade do balanço do ME-II para o comboio de 3 veículos TB-12

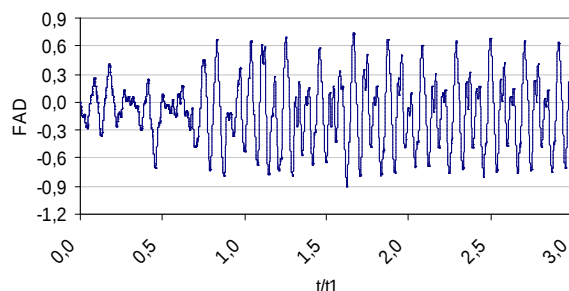


Figura 20. Deslocamento na extremidade do balanço do ME-II para o comboio de 6 veículos TB-12

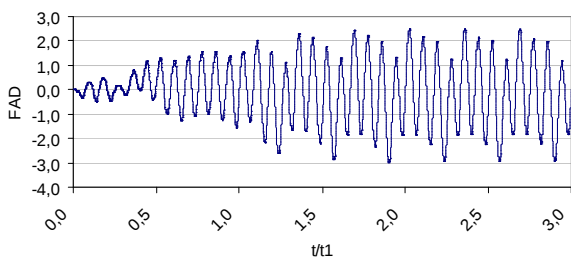


Figura 21. Momento fletor positivo na seção central do ME-II para o comboio de 3 veículos TB-12

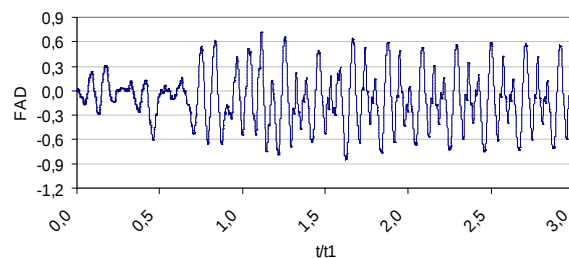


Figura 22. Momento fletor positivo na seção central do ME-II para o comboio de 6 veículos TB-12

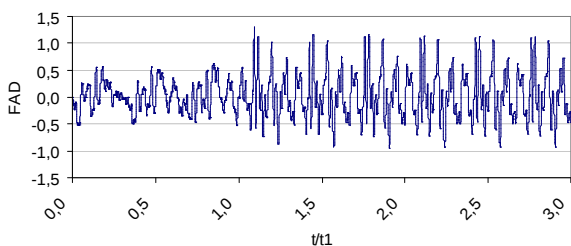


Figura 23. Momento fletor negativo na seção do apoio esquerdo do ME-II para o comboio de 3 veículos TB-12

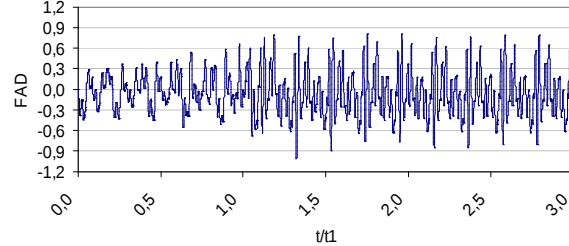


Figura 24. Momento fletor negativo na seção do apoio esquerdo do ME-II para o comboio de 6 veículos TB-12

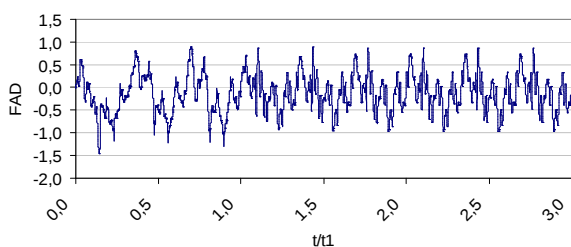


Figura 25. Esforço cortante na seção do apoio esquerdo do ME-II para o comboio de 3 veículos TB-12

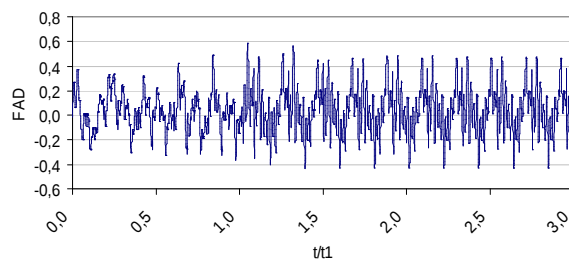


Figura 26. Esforço cortante na seção do apoio esquerdo do ME-II para o comboio de 6 veículos TB-12

Os valores dos fatores de amplificação dinâmicos máximos médios, $[FAD]_{\text{médio}}$, apresentados nesses gráficos correspondem a uma análise estatística feita mediante a travessia de diversos comboios de veículos sobre 50 (cinquenta) amostras de irregularidades distintas, referentes a pavimentos de qualidade excelente. Ao longo da análise foi considerado exclusivamente o efeito da interação dos pneus dos veículos dos comboios com a superfície irregular das pontes de concreto armado analisadas.

As Figuras 27 a 29 apresentam os resultados da presente análise para comboios compostos por dois veículos do tipo TB-12 ABNT [7], pois foi constatado que este comboio gerou as maiores amplificações dinâmicas sobre esta ponte em particular, ao longo das análises realizadas. São consideradas as velocidades das viaturas na faixa de 40km/h a 120km/h e os espaçamentos entre os veículos são modificados na faixa de 7,5 a 15,0m ($l = 7,5\text{m}$ até 15,0m, Figura 6).

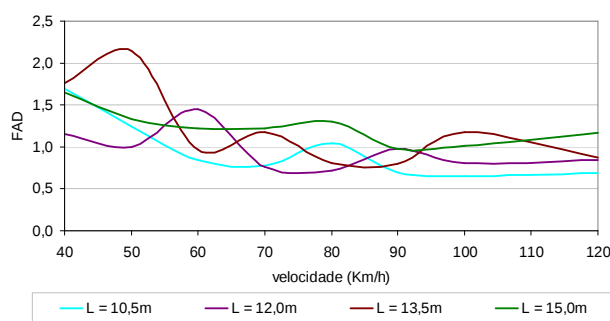


Figura 27. Variação do FAD referente aos deslocamentos translacionais verticais. Seção do meio do vão. Comboio com 2 veículos do tipo TB-12

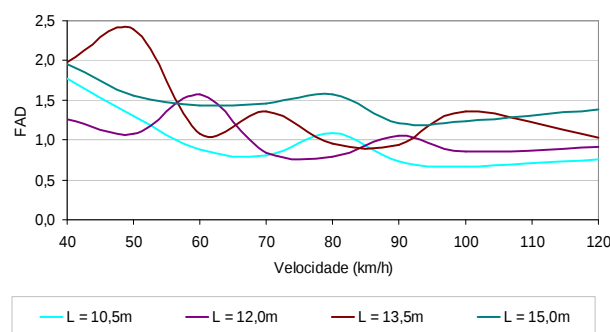


Figura 28. Variação do FAD referente aos momentos fletores. Seção do meio do vão. Comboio com 2 veículos do tipo TB-12

Percebe-se, claramente, que não existe uma relação direta (relação linear) entre os valores dos fatores de amplificação dinâmicos máximos médios, $[FAD]_{\text{médio}}$, para os deslocamentos e esforços, com referência a va-

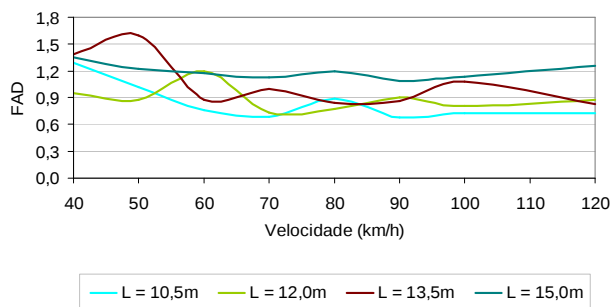


Figura 29. Variação do FAD referente aos esforços cortantes. Seção do apoio esquerdo. Comboio com 2 veículos do tipo TB-12

riação da velocidade e do espaçamento entre os veículos dos comboios. Pode-se verificar que existe uma variação não-linear nas curvas associadas a essas grandezas (deslocamentos e esforços), embora esses gráficos apresentem uma tendência de comportamento comum, conforme ilustrado nas Figuras 27 a 29.

Por outro lado, considerando-se que a análise possui um caráter estatístico, pois considera a travessia de comboios de veículos (2, 3, 4 e 5 veículos), mediante o emprego de cinquenta amostras de irregularidades e com diferentes velocidades (na faixa de 40km/h a 120km/h), pode-se concluir, de acordo com a tendência dos gráficos, que os maiores valores obtidos para o $[FAD]_{\text{médio}}$ estão associados às velocidades mais baixas (entre 40km/h e 60km/h) e a um maior espaçamento entre os veículos (entre 13,5m a 15m), de acordo com as Figuras 27 a 29.

Na presente análise, o valor máximo encontrado para o $[FAD]_{\text{médio}}$ dos deslocamentos translacionais verticais foi da ordem de 2,2 (seção do meio do vão) (Figura 27). Para os momentos fletores este valor foi igual a 2,4 (seção do meio do vão), Figura 28. No que diz respeito aos esforços cortantes máximos médios o valor máximo do $[FAD]_{\text{médio}}$ foi da ordem de 1,6 (seção do apoio esquerdo) (Figura 29).

Conforme exposto anteriormente, verifica-se que as ações dinâmicas provenientes das irregularidades superficiais com qualidade da pista excelente, representam parcela considerável na resposta do sistema veículo-ponte, chegando mesmo a ultrapassar as produzidas pelas ações estáticas devidas ao peso das viaturas e as produzidas pela mobilidade da carga (Figuras 27 a 29).

4.2.1. Ponte simplesmente apoiada com balanços - ME-II

As Figuras 30 a 34 apresentam os resultados da análise para comboios compostos por três veículos do tipo TB-12 ABNT7, pois foi constatado que este com-

boio gerou as maiores amplificações dinâmicas sobre este modelo estrutural em particular, ao longo das análises realizadas. São consideradas as velocidades na faixa de 40km/h a 120km/h e os espaçamentos entre veículos são modificados na faixa de 7,5 a 15,0m ($l = 7,5$ m até 15,0m, Figura 6).

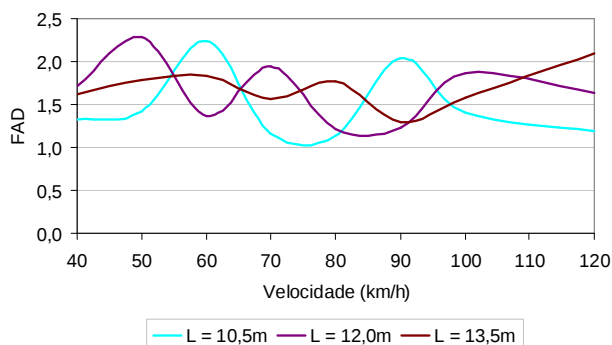


Figura 30. Variação do FAD referente aos deslocamentos translacionais verticais. Seção do meio do vão central. Comboio com 3 veículos do tipo TB-12

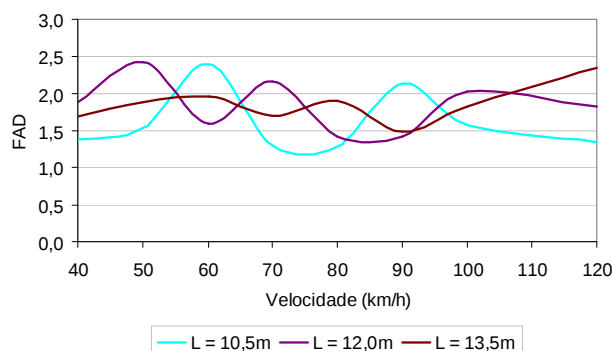


Figura 31. Variação do FAD referente aos deslocamentos translacionais verticais. Extremidade do balanço. Comboio com 3 veículos do tipo TB-12

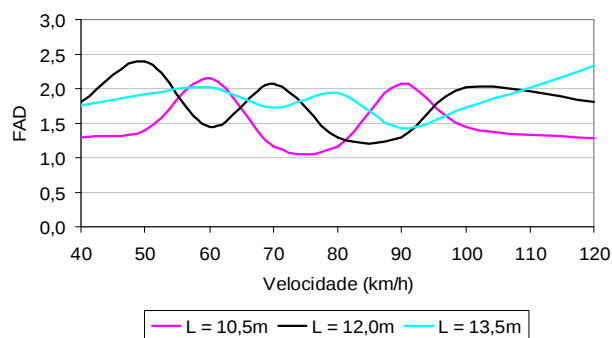


Figura 32. Variação do FAD referente aos momentos fletores positivos. Seção do meio do vão central. Comboio com 3 veículos do tipo TB-12

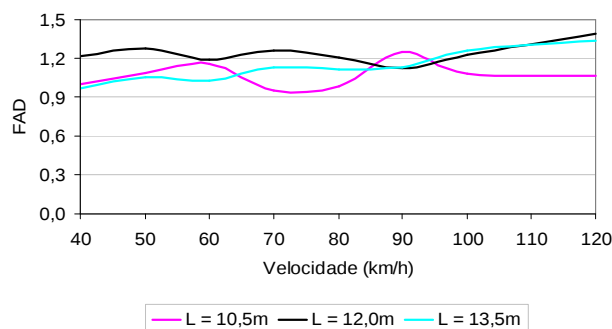


Figura 33. Variação do FAD referente aos momentos fletores negativos. Seção do apoio esquerdo. Comboio com 3 veículos do tipo TB-12

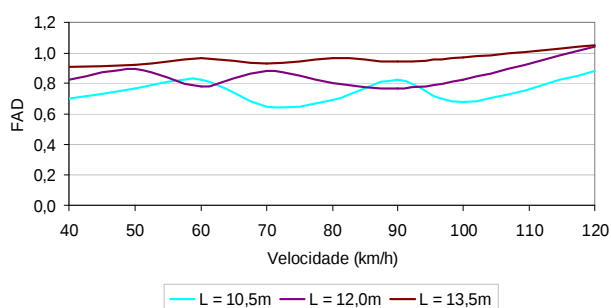


Figura 34. Variação do FAD referente aos esforços cortantes. Seção do apoio esquerdo. Comboio com 3 veículos do tipo TB-12

No que diz respeito às observações associadas à influência da velocidade e do espaçamento entre veículos dos comboios, no que tange ao ME-II, Figuras 30 a 34, constata-se que, basicamente, as conclusões alcançadas, em termos qualitativos, são semelhantes a aquelas já enunciadas para o caso anterior (ME-I). Deste modo, destacam-se apenas as conclusões mais relevantes.

Percebe-se, novamente que não há uma relação direta (relação linear) entre os valores dos fatores de amplificação dinâmicos máximos médios, $[FAD]_{\text{médio}}$, para os deslocamentos e esforços, com referência a variação da velocidade e do espaçamento entre os veículos dos comboios. As curvas apresentam uma variação não-linear (deslocamentos e esforços), com uma tendência definida (Figuras 30 a 34).

Assim sendo, conclui-se que os maiores valores obtidos para o $[FAD]_{\text{médio}}$ estão associados às velocidades mais baixas (entre 40km/h e 70km/h) e a um maior espaçamento entre os veículos (entre 13,5m a 15m) (Figuras 30 a 34). O valor máximo encontrado para o $[FAD]_{\text{médio}}$ dos deslocamentos translacionais verticais foi da ordem de 2,3 (seção do meio do vão) (Figura 30),

e igual a 2,4 para a seção da extremidade do balanço (Figura 31). Para os momentos fletores positivos este valor foi igual a 2,4 (seção do meio do vão) (Figura 32), e da ordem de 1,3 para os momentos fletores negativos da seção do apoio esquerdo (Figura 33). Para os esforços cortantes máximos médios o valor máximo do $[FAD]_{\text{médio}}$ foi da ordem de 1,0 (seção do apoio esquerdo) (Figura 34).

4.3. Efeitos do número de veículos sobre as obras de arte

Nesta análise, apresentam-se os resultados correspondentes à variação do número de veículos sobre as estruturas (ME-I e ME-II). Deste modo, as Figuras 35 a 42 apresentam os valores dos fatores de amplificação dinâmicos máximos médios, $[FAD]_{\text{médio}}$, associados as grandezas da resposta da ponte em estudo, no que tange aos deslocamentos e esforços.

Novamente, os valores dos fatores de amplificação dinâmicos máximos médios, $[FAD]_{\text{médio}}$, apresentados nos gráficos correspondem a uma análise estatística feita mediante a travessia de diversos comboios de veículos sobre 50 (cinquenta) amostras de irregularidades distintas, referentes a pavimentos de qualidade excelente. Ao longo da análise foi considerado exclusivamente o efeito da interação dos pneus dos veículos dos comboios com a superfície irregular das pontes de concreto armado analisadas.

4.3.1. Ponte simplesmente apoiada - ME-I

As Figuras 35 a 37 apresentam a variação dos fatores de amplificação dinâmicos máximos médios, $[FAD]_{\text{médio}}$, com relação ao número de veículos que trafegam sobre o tabuleiro da ponte, a saber: 2, 3, 4 e 5 veículos do tipo TB-12 ABNT [7], com velocidades das viaturas na faixa de 40km/h a 120km/h. Ressalta-se que os espaçamentos entre os carros foram variados, convenientemente, de acordo com cada comboio ($l=7,5\text{m}$ até $15,0\text{m}$, Figura 6).

Observando-se as Figuras 35 a 37, percebe-se, novamente, que os níveis das amplificações são elevados, no que tange ao efeito dinâmico produzido pela interação dos pneus dos veículos do comboio com amostras de irregularidades representativas de um pavimento de qualidade excelente (em torno de 50 a 80 % dos efeitos máximos produzidos pela presença estática dos veículos).

Verifica-se também que um comboio que possui um pequeno número de veículos, de forma geral, é o responsável pelos maiores valores do fator de amplificação dinâmico, pois estes comboios são os que tendem a se

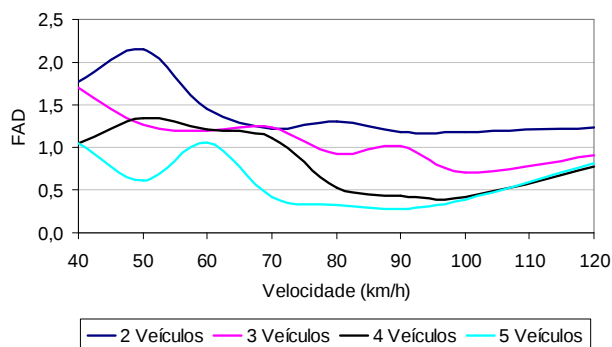


Figura 35. Variação do FAD para os deslocamentos translacionais verticais máximos médios. Seção do meio do vão. Qualidade do pavimento: pista excelente

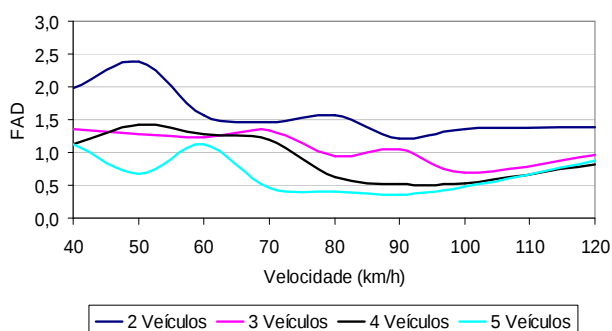


Figura 36. Variação do FAD para os momentos fletores máximos médios. Seção do meio do vão. Qualidade do pavimento: pista excelente

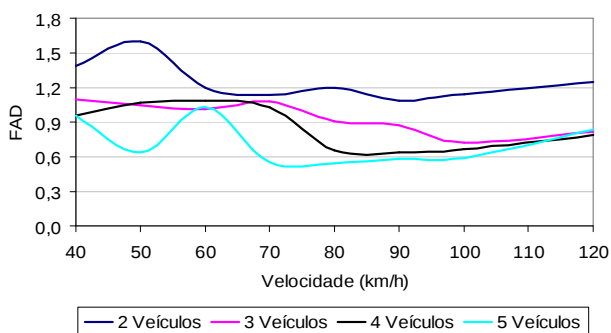


Figura 37. Variação do FAD para os esforços cortantes máximos médios. Seção do apoio esquerdo. Qualidade do pavimento: pista excelente

aproximar das frequências naturais das obras de arte estudadas. Tal fato também encontra-se relacionado com a massa e a rigidez do sistema veículo-ponte, pois quando existe um número pequeno de veículos sobre a obra de arte, o sistema veículo-ponte torna-se mais suscetível às amplificações dinâmicas. Entretanto, em termos absolutos (quantitativos), um maior número de veículos no comboio produz os maiores valores de esforços e deslocamentos.

Portanto, conclui-se que as amplificações máximas médias encontradas ao longo da presente análise estatística para o sistema estrutural I (ME-I: veículos com dois eixos), ocorrem quando a velocidade das viaturas do comboio é da ordem de 50 km/h. Assim sendo, a amplificação dinâmica máxima média encontrada para os deslocamentos translacionais verticais foi igual a 2,2 (Figura 35). Para os momentos fletores esta amplificação foi da ordem de 2,4 (Figura 36); e, finalmente, para os esforços cortantes tal amplificação foi igual a 1,6 (Figura 37).

4.3.2. Ponte simplesmente apoiada com balanços - ME-II

As Figuras 38 a 42 apresentam a variação dos fatores de amplificação dinâmicos máximos médios, $[FAD]_{\text{médio}}$, com relação ao número de viaturas que trafegam sobre a obra de arte, a saber: 2, 3, 4, 5 e 6 veículos do tipo TB-12 ABNT [7]. A faixa de velocidades consideradas é da ordem de 40km/h a 120km/h. Destaca-se, novamente, que os espaçamentos entre os carros foram variados, convenientemente, de acordo com cada comboio ($l=7,5\text{m}$ até $15,0\text{m}$, Figura 6).

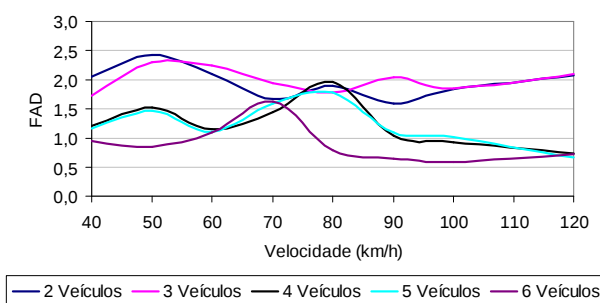


Figura 38. Variação do FAD para os deslocamentos translacionais verticais máximos médios. Seção do meio do vão

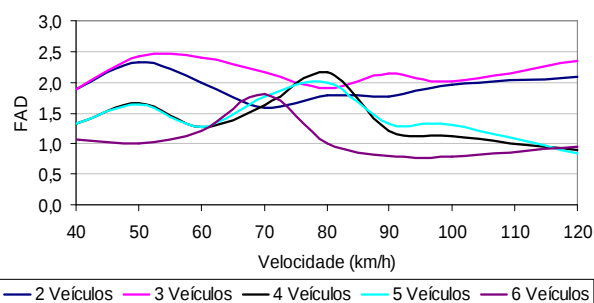


Figura 39. Variação do FAD para os deslocamentos translacionais verticais máximos médios. Extremidade do balanço

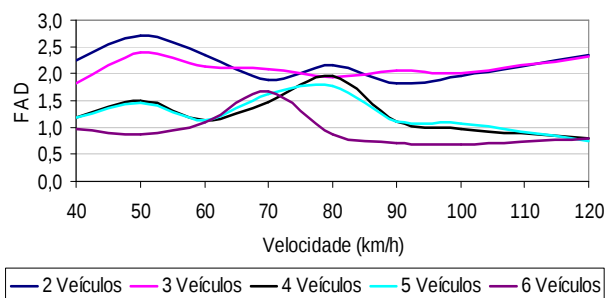


Figura 40. Variação do FAD para os momentos fletores máximos médios. Seção do meio do vão

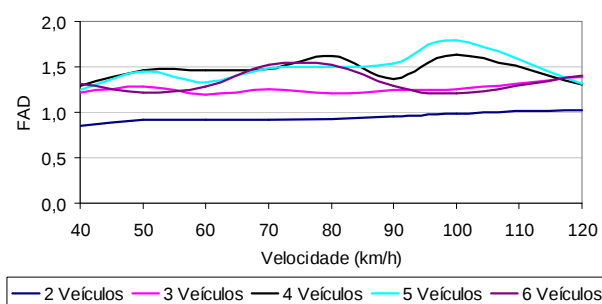


Figura 41. Variação do FAD para os momentos fletores máximos médios. Extremidade do balanço

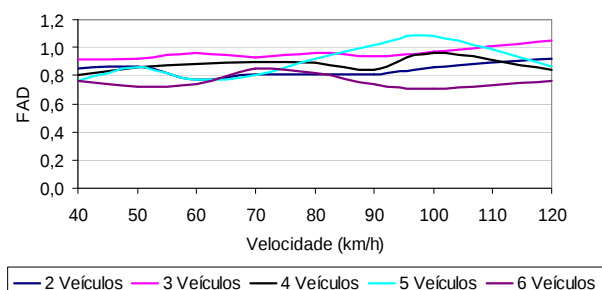


Figura 42. Variação do FAD para os esforços cortantes máximos médios. Seção do apoio esquerdo

Com relação ao modelo estrutural II, ME-II (Figuras 38 a 42), observa-se que os fatores de amplificação dinâmicos máximos médios, $[FAD]_{\text{médio}}$, provenientes exclusivamente das irregularidades da pista, ocorrem quando três e em alguns casos quatro veículos atravessam a ponte e superam os efeitos máximos produzidos pela presença estática dos veículos.

Conclui-se que as amplificações máximas encontradas ao longo da presente análise estatística para o ME-II (veículos com dois eixos), ocorrem quando a velocidade das viaturas do comboio é da ordem de 50 km/h. Assim sendo, a amplificação máxima encontrada para

os deslocamentos translacionais verticais foi igual a 2,4 (seção do meio do vão), Figura 38, e da ordem de 2,5 para a seção da extremidade do balanço, Figura 39. Para os momentos fletores positivos (seção do meio do vão) este valor de amplificação foi da ordem de 2,7 (Figura 40), e para os momentos fletores negativos (seção do apoio esquerdo) (Figura 41), tal amplificação alcança 1,8. Já para as reações, no apoio esquerdo, não se verifica uma grande amplificação dos resultados em relação aos estabelecidos pela norma de projeto (aproximadamente 1,1, de acordo com a Figura 42).

De acordo com os níveis de amplificação encontrados nas seções dos balanços, no que tange a obra de arte investigada neste trabalho, pode-se concluir que estas seções devem merecer atenção especial por parte dos projetistas desse tipo de estrutura.

4.4. Efeitos das condições do pavimento sobre a resposta dinâmica das pontes

Nesta seção são apresentadas comparações entre as respostas dinâmicas para três tipos de pavimentos (excelente, médio e ruim). As obras de arte adotadas para esta análise foram os modelos estruturais ME-I e ME-II. Destaca-se que neste item da investigação, considera-se a ação conjunta dos efeitos referentes a mobilidade da carga (efeito do peso dos veículos) e da interação dos pneus dos veículos dos comboios com a superfície irregular da ponte de concreto armado.

4.4.1. Ponte simplesmente apoiada - ME-I

Apresenta-se nas Figuras 43 a 45, a variação dos fatores de amplificação dinâmicos máximos médios, $[FAD]_{\text{médio}}$, em relação à qualidade das pistas (excelente, médio e ruim), para comboios de dois veículos tipo TB-12 ABNT7, pois foi observado que este comboio em particular causa ressonância para o Modelo Estrutural I (ME-I). São consideradas as velocidades na faixa de 40km/h a 120km/h e os espaçamentos entre veículos são modificados na faixa de 7,5 a 15,0m (Figura 6).

Conforme esperado, a qualidade do pavimento influencia de forma decisiva na resposta dinâmica da estrutura, pois, observando-se os valores do $[FAD]_{\text{médio}}$, mostrados nas Figuras 43 a 45, percebe-se, claramente, o nível bastante elevado das amplificações existentes sobre as obras de arte rodoviárias analisadas, mesmo considerando-se pavimentos de qualidade excelente, algo difícil de encontrar-se nas rodovias e pontes do Brasil.

Percebe-se, ainda, que à medida que a qualidade do pavimento diminui essas amplificações aumentam drasticamente, (da ordem de 4 para pavimentos de qualida-

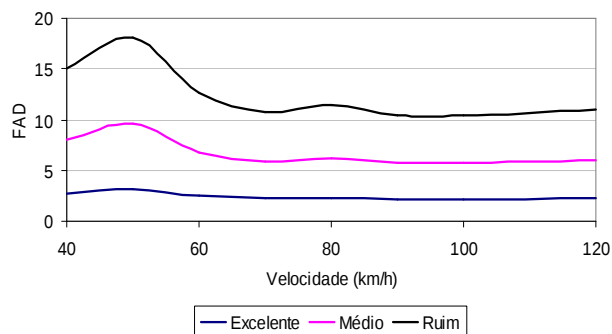


Figura 43. Variação do FAD referente aos deslocamentos translacionais verticais. Seção do meio do vão

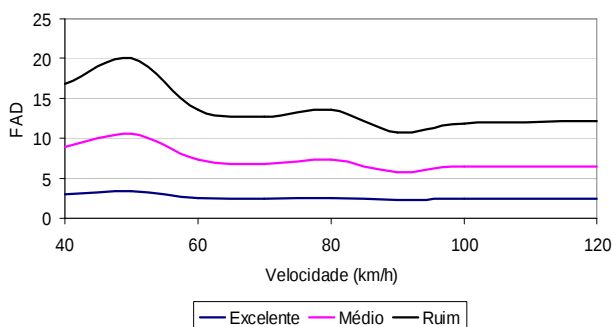


Figura 44. Variação do FAD referente aos momentos fletores. Seção do meio do vão

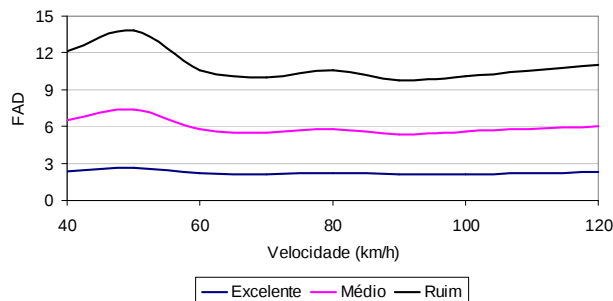


Figura 45. Variação do FAD referente aos esforços cortantes. Seção do apoio esquerdo

de excelente, em torno de 10 para pistas com qualidade média e próximo de 20 para pistas com qualidade ruim (Figura 44)). Ou seja, com a deterioração do pavimento essas amplificações aumentam exponencialmente, denotando que o problema em questão é grave.

Como foi mostrado em estudos recentes Lopes [1], Amorim [2], Almeida [4], Silva [5,6], pode-se observar que, sem sombra de dúvidas, as ações dinâmicas oriundas da interação existente entre as viaturas e o perfil irregular, geram níveis de deslocamentos e esforços muito severos sobre os tabuleiros das pontes rodoviárias, especialmente, com relação àqueles considerados usualmente em projeto.

A ação conjunta da mobilidade da carga (efeito do peso dos veículos) e dos efeitos dinâmicos provenientes interação dos pneus dos veículos dos comboios com as irregularidades superficiais amplifica consideravelmente as respostas dinâmicas do sistema veículo-ponte, indicando, mais uma vez, a importância de se levar em conta o efeito das irregularidades da pista sobre o comportamento dos tabuleiros rodoviários.

4.4.2. Ponte simplesmente apoiada com balanços - ME-II

Apresenta-se nas Figuras 46 a 50, a variação dos Fatores de Amplificação Dinâmicos máximos médios, $[FAD]_{\text{médio}}$, em relação a qualidade das pistas (excelente, médio e ruim), para comboios de três veículos tipo TB-12 ABNT [7], pois foi observado que este comboio em particular causa ressonância para o Modelo Estrutural II (ME-II). São consideradas as velocidades na faixa de 40km/h a 120km/h e os espaçamentos entre veículos são modificados na faixa de 7,5 a 15,0m (Figura 6).

Observando-se as Figuras 46 a 50, observa-se que as conclusões alcançadas na análise da variação dos Fatores de Amplificação Dinâmicos máximos médios, $[FAD]_{\text{médio}}$, em relação à qualidade da pista, correspondente ao ME-II, em termos qualitativos, são absolutamente idênticas aquelas já enunciadas anteriormente para o caso do ME-I, portanto são destacadas, a seguir, apenas as conclusões mais relevantes.

Novamente, percebe-se que a ação conjunta da mobilidade da carga (efeito do peso dos veículos) e dos efeitos dinâmicos provenientes interação dos pneus dos veículos dos comboios com o pavimento irregular amplifica consideravelmente as respostas dinâmicas do sistema veículo-ponte. Portanto, conclui-se que, as ações dinâmicas oriundas da interação existente entre as viaturas e o perfil irregular, geram níveis de deslocamentos e esforços muito severos sobre os tabuleiros das pontes rodoviárias, especialmente, com relação àqueles considerados usualmente em projeto.

Verifica-se que, com a redução da qualidade do pavimento, essas amplificações aumentam drasticamente, (da ordem de 3 para pavimentos de qualidade excelente, em torno de 12 para pistas com qualidade média, e próximo de 22 para pistas com qualidade ruim (Figura 48)). Ou seja, a partir da deterioração do pavimento essas amplificações dinâmicas, associadas aos deslocamentos e esforços, aumentam exponencialmente, de acordo com resultados obtidos em trabalhos de pesquisa recentes Lopes [1], Amorim [2], Almeida [4], Silva [5,6].

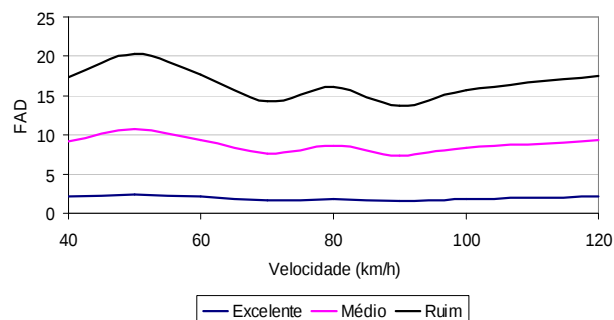


Figura 46. Variação do FAD referente aos deslocamentos translacionais verticais. Seção do meio do vão

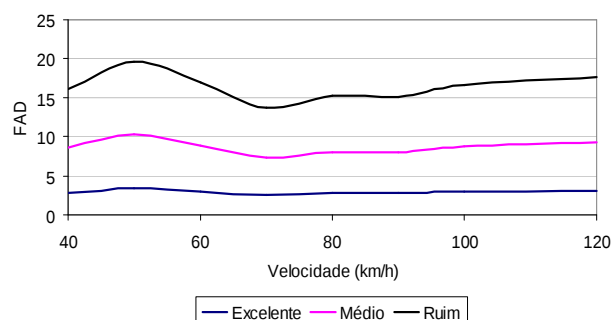


Figura 47. Variação do FAD referente aos deslocamentos translacionais verticais. Extremidade do balanço

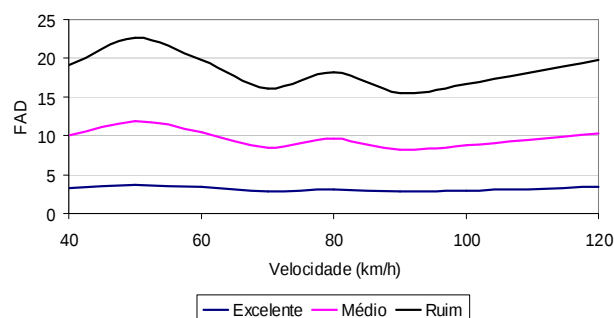


Figura 48. Variação do FAD referente aos momentos fletores positivos. Seção do meio do vão

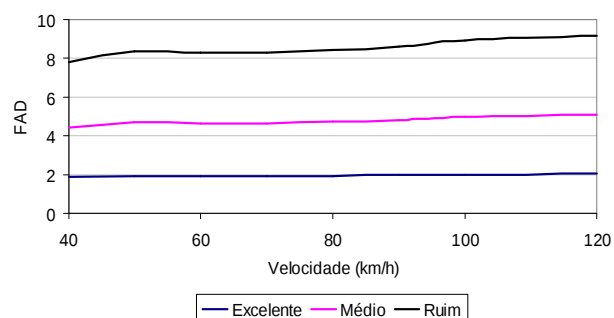


Figura 49. Variação do FAD referente aos momentos fletores negativos. Extremidade do balanço

5. Conclusões

Ao longo deste trabalho de pesquisa foi desenvolvida uma extensa análise paramétrica, considerando-se dois

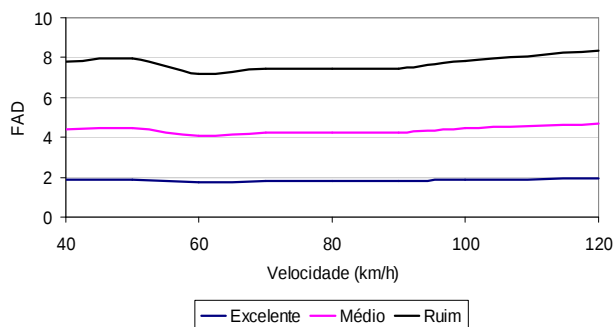


Figura 50. Variação do FAD referente aos esforços cortantes. Seção do apoio esquerdo

modelos estruturais reais e existentes (ponte simplesmente apoiada e simplesmente apoiada com balanços), submetidas à passagem de comboios de veículos com dois eixos sobre o pavimento irregular (pistas com qualidade excelente, média e ruim). Este estudo paramétrico conduziu às seguintes conclusões:

1. A metodologia de análise desenvolvida e apresentada neste trabalho de pesquisa para a avaliação da influência da velocidade, do espaçamento e do número de veículos sobre a resposta dinâmica de pontes rodoviárias de concreto armado, segundo análise no domínio do tempo (modelo estatístico), apresenta-se consistente no que tange aos aspectos quantitativos e qualitativos da resposta, o que assegura confiabilidade aos resultados e conclusões obtidos neste estudo.
2. Esta investigação considera os veículos com as mesmas características dinâmicas (massa, rigidez e amortecimento). Os veículos trafegam sobre os tabuleiros das pontes com velocidade e espaçamento constantes. O pavimento das obras de arte é considerado irregular. Os resultados aqui apresentados dizem respeito, especialmente, a condições de ressonância, representativas dos valores máximos da resposta dinâmica permanente dos modelos estruturais investigados.
3. O fenômeno da ressonância, oriundo da travessia dos comboios de veículos sobre os tabuleiros das obras de arte, depende, fundamentalmente, da velocidade e do espaçamento entre as viaturas, e certamente pode vir a ocorrer em situações reais da prática corrente de projeto, especialmente, para tabuleiros rodoviários muito flexíveis, nos quais a frequência fundamental da ponte se aproxime da frequência de travessia oriunda de um comboio de veículos. Tal fato não é levado em conta nas prescrições das normas e recomendações de projeto que tratam deste assunto.
4. A velocidade e o espaçamento entre os veículos influenciam significativamente a resposta dinâmica do sistema veículo-ponte. Contudo, constata-se que não existe uma relação direta (relação linear) entre as grandezas da resposta (deslocamentos e esforços) em relação aos parâmetros de velocidade e espaçamento das viaturas.
5. Observa-se que existe uma variação não-linear nas curvas associadas à resposta dinâmica das pontes (deslocamentos e esforços), de acordo com a variação da velocidade e espaçamento entre os veículos, embora esses gráficos apresentem certa tendência de comportamento, ou seja: os maiores valores obtidos para as amplificações dinâmicas estão associados a velocidades mais baixas das viaturas (entre 40km/h e 70km/h) e, também, aos maiores espaçamentos entre os veículos.
6. A consideração da qualidade do pavimento mostrou-se de grande importância na análise da resposta dinâmica das estruturas, pois os valores dos fatores de amplificação dinâmicos máximos médios (deslocamentos e esforços) crescem na razão direta do decréscimo de qualidade do pavimento. Em diversos casos, essas amplificações chegam mesmo a ultrapassar com boa margem aos efeitos produzidos pela presença estática dos veículos sobre as pontes.
7. Ao longo da investigação foi verificado que as ações mais severas transmitidas à superestrutura das pontes são ocasionadas pela ocorrência de irregularidades superficiais ao longo da pista de rolamento, correspondendo, em situações extremas, relacionadas a pavimentos de qualidade muito inferior, a valores da resposta bem mais elevados do que aqueles admitidos em projeto. Tal situação é bastante relevante e merece ser tratada com cuidado no âmbito das normas de projeto que tratam da regulamentação desse tipo de estrutura.
8. Propor recomendações de projeto para as solicitações oriundas das irregularidades da pista seria antieconômico e totalmente fora de propósito. Assim sendo, recomenda-se como solução absolutamente inadiável para o problema realizar uma conservação permanente, preventiva e corretiva, assegurando então que as superfícies de rolamento dos tabuleiros rodoviários estejam sempre livres de irregularidades: “lombadas” e “costelas”.
9. Convém chamar a atenção do leitor para o fato de que os projetistas de pontes devem atentar para o fato de que frequências naturais do sistema veículo-viga podem coincidir com frequências de travessia (ou de excitação), provenientes do comboio de veículos. Tal fato é relevante, pois pode provocar uma situação de ressonância. Evidentemente, sob essas

condições, o tabuleiro atinge uma situação em que predomina a fase permanente da resposta, com repetições de valores extremos (amplificações elevadas), de interesse direto para uma análise de fadiga do material.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, FAPERJ, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, e ao Conselho Nacional de Pesquisa, CNPq, o auxílio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

Referencias

1. Lopes E.D.C. (2008) Influência da velocidade, do espaçamento e do número de veículos sobre a resposta dinâmica de pontes rodoviárias de concreto armado. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGE CIV, Faculdade de Engenharia, FEN, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, 148 páginas, Rio de Janeiro, Brasil
2. de Amorim A.B.A. (2007) Avaliação da resposta dinâmica de pontes rodoviárias com pavimentos irregulares e comparação com a metodologia de projeto proposta pela NBR 7187. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGE CIV, Faculdade de Engenharia, FEN, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, 145 páginas, Rio de Janeiro, Brasil
3. Melo E.S (2007) Interação dinâmica veículo-estrutura em pequenas pontes rodoviárias. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 148 páginas, Rio de Janeiro, Brasil
4. Almeida R.S. (2006) 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, Rio de Janeiro, Brasil
5. Silva J.G.S. (2004) Dynamical performance of highway bridge decks with irregular pavement surface. *Computer & Structures* 82(11-12):871–881
6. Silva J.G.S. (1996) Análise dinâmica não-determinística de tabuleiros de pontes rodoviárias com irregularidades superficiais. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil
7. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984) Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre - NBR 7188
8. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003) Projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido - NBR 7187
9. Zienkiewicz O.C. (1971) The Finite Element Method in Engineering Science. McGraw-Hill, London
10. Wang T.L., Huang D., Shahawy M. (1994) Dynamic behavior of slant-legged rigid frame highway bridge. *ASCE, Journal of Structural Engineering* 120(3) 885–902
11. Dodds J.C., Robson J.D. (1973) The Description of Road Surface Roughness. *Journal of Sound and Vibration* 31(2) 175–183
12. Braun H. (1969) Untersuchungen Von Fahrbahnunebenheiten und Anwendungen der Ergebnisse. Von der Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation
13. Braun H. (1966) Untersuchungen über Fahrbahnunebenheiten. Deutsche Kraftfahrtforschung und Strassenverkehrstechnik
14. Sedlacek G., Drosner St. (1990) Dynamik bei Brücken. Institut für Stahlbau, RWTH Aachen, Mies van der Rohe Str. 1, 5100, Aachen, U. Braunschweig, U. Hannover