



XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

MODELOS ANALÍTICO-NUMÉRICOS PARA INTERAÇÃO DINÂMICA VEÍCULO-PAVIMENTO-ESTRUTURA

Andréa Oliveira de Araujo

Michèle Schubert Pfeil

Hugo Campêlo Mota

andrea_araujo@coc.ufrj.br

mpfeil@coc.ufrj.br

hugocmota8@gmail.com

Instituto COPPE/UFRJ - Programa de Engenharia Civil

Av. Horácio Macedo 2030, Cidade Universitária, 21941-972, Rio de Janeiro, Brasil

Ronaldo Carvalho Battista

battista@coc.ufrj.br

Instituto COPPE/UFRJ - Programa de Engenharia Civil / Controllato – Projeto, Monitoração e Controle de Estruturas

Av. Horácio Macedo 2030, Cidade Universitária, 21941-972, Rio de Janeiro, Brasil / Rua Fonseca Teles 129, São Cristóvão, 20940-200, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo. *Este trabalho tem por objetivo a comparação entre resultados obtidos de duas modelagens para interação dinâmica veículo - pavimento - estrutura de ponte: uma em que a estrutura é representada por modelo numérico unifilar e a solução é modal e outra em que o tabuleiro da ponte é modelado por elementos finitos de casca sendo a solução do problema efetuada em coordenadas nodais. Os modelos foram aplicados a uma estrutura de ponte que representa grande parte das obras de arte brasileira, sob a passagem de um veículo de três eixos em distintas condições do pavimento. Os resultados em termos de deslocamento mostram uma boa correlação entre os métodos, desde que os dois tipos de modelo numérico da estrutura representem de forma equivalente as propriedades dinâmicas associadas aos modos de vibração determinantes no comportamento da ponte sob a ação da passagem de veículos.*

Palavras-chaves: Pontes Rodoviárias, Interação dinâmica, Veículo-Pavimento-Estrutura

1 INTRODUÇÃO

Devido ao desgaste natural dos materiais e a falta de manutenção das obras de arte e rodovias, são frequentemente encontrados danos nas estruturas de pontes, como desgastes da pavimentação, das juntas de dilatação e dos aparelhos de apoio e ainda ressaltos na pista juntos às extremidades da obra. Esta última patologia é uma das principais causas dos níveis excessivos de vibrações em pontes de pequenos vãos (pontilhões).

Os efeitos dinâmicos em pontes induzidos pelo tráfego de veículos pesados são considerados, pela norma brasileira de projeto de pontes rodoviárias (NBR 7187, 2003), através da multiplicação das solicitações estáticas pelo coeficiente de impacto (NBR 7188, 2013). No entanto, este procedimento não representa adequadamente a ação do tráfego real de veículos nas rodovias brasileiras e pode conduzir, em alguns casos, a resultados insuficientes para garantir o conforto e segurança dos usuários, ou ainda, a resultados conservadores (ROSSIGALI, 2013).

Com o intuito de contribuir nas análises de interação dinâmica entre o veículo, o pavimento rugoso e a estrutura de ponte rodoviária duas metodologias analítico-numérico-computacionais foram desenvolvidas no PEC-COPPE/UFRJ. Uma delas utiliza uma modelagem simplificada (MELO, 2007, MENDONÇA, 2009, ARAUJO, 2014) na qual a estrutura da ponte é representada por um modelo unifilar com elementos de barra alinhados ao eixo longitudinal da obra (Figura 1(a)) e a solução é modal. A outra (E. F. SANTOS, 2007, C. A. N. SANTOS, 2013) faz o uso de elementos finitos de casca para modelagem do tabuleiro da ponte (ver Figura 1(b)) e a solução do sistema de equações de movimento é feita em coordenadas nodais. Nestas duas modelagens o veículo é representado por um conjunto de massas, molas e amortecedores.

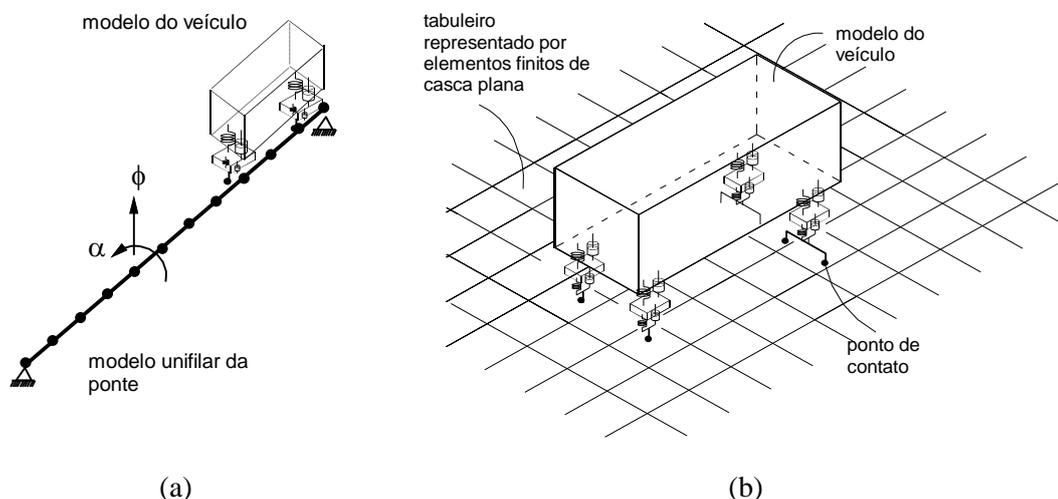


Figura 1. (a) Modelo unifilar (b) MEF-3D

A solução modal com modelo numérico unifilar é, naturalmente, muito mais eficiente em termos de tempo de processamento mas apresenta limitações em relação à modelagem da estrutura, que é feita de forma mais refinada com o modelo de casca. Desta forma, o presente trabalho apresenta as duas metodologias e compara os resultados obtidos em termos de deslocamento vertical, através da aplicação dos métodos a uma estrutura de ponte em concreto armado com duas longarinas - sistema este que representa grande parte das obras de

arte brasileira - sob a passagem de um veículo de três eixos submetido a diversas condições de pavimento, velocidade e possibilidade de ressalto na entrada da estrutura.

A metodologia mais refinada, que faz o uso de elementos de casca, foi validada experimentalmente para ação de veículos em uma ponte de concreto armado de múltiplas células (SANTOS, 2013; EVACES) e para um tabuleiro ortotrópico em aço (BATTISTA, 2011).

2 MODELOS ANALÍTICO-NUMÉRICOS

As equações de movimento da interação dinâmica veículo-pavimento-estrutura para cada modelo foram formuladas a partir dos modelos analíticos do veículo e da estrutura conforme cada metodologia, incluindo a presença do pavimento rugoso. Os modelos matemáticos do veículo e da estrutura podem ser encontrados em SANTOS (2007), para o modelo de casca, e MELO (2007), para o unifilar.

O modelo analítico-numérico mais refinado, denominado neste trabalho como MEF-3D de casca, utiliza elementos planos de casca para modelar o tabuleiro da ponte. O modelo do veículo se conecta, portanto, aos elementos de casca. Já no modelo unifilar (Figura 2(b)), a estrutura é representada através de uma discretização unifilar com elementos de barra alinhados segundo o eixo longitudinal da ponte. O modelo simplificado é obtido a partir de um modelo de grelha tridimensional (Figura 2(a)) e cada forma modal original considerada é substituída por outra relativa a torção axial ou flexão (FERREIRA, 1999).

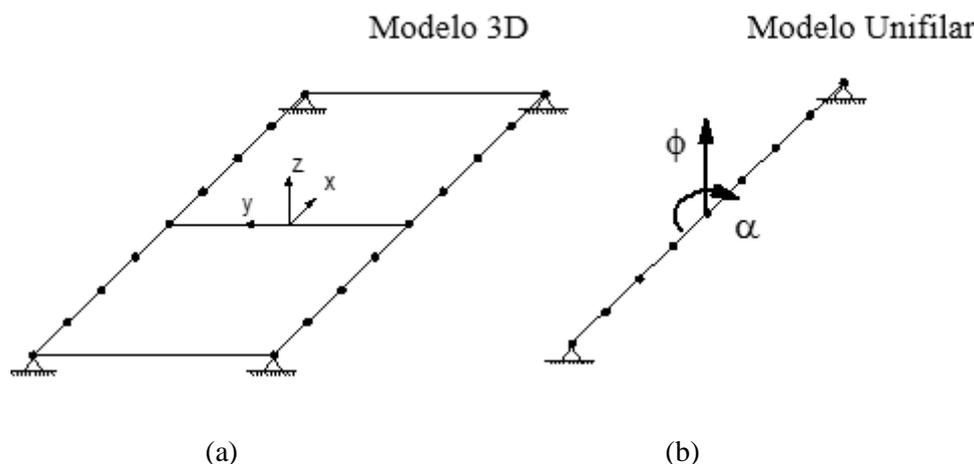


Figura 2. Modelos numéricos da estrutura: (a) modelo 3D para análise de vibração livre, e (b) modelo unifilar para análise da interação dinâmica veículo-estrutura (PFEIL *et al.*, 2010)

Os sistemas de equações dinâmicas de interação, utilizados neste trabalho, consideram o caminhão de três eixos em suas modelagens matemáticas, veículo este com maior frequência de passagem nas rodovias brasileiras (ROSSIGALI, 2013). No método unifilar o veículo é representado por um sistema plano de massas e molas associado a 5 graus de liberdade (Figura 3), e o modelo é composto por uma massa suspensa (m_v), apoiada em três massas não suspensas ($m_{p,i}$). A ligação entre essas massas é feita por meio das suspensões formadas pelo conjunto mola-amortecedor ($k_{v,i}$ e $c_{v,i}$) e por fim as massas não suspensas se apoiam no pavimento da estrutura através do conjunto mola-amortecedor ($k_{p,i}$ e $c_{p,i}$) equivalente aos pneus.

Já no MEF-3D o veículo é representado por um sistema tridimensional de massas ligadas por molas e amortecedores (Figura 4) com 8 graus de liberdade. Este sistema é composto pelo movimento vertical (u_v) e rotacional (θ_v) da massa suspensa (m_v) como corpo rígido e dos deslocamentos verticais ($u_{p,i}$) das seis massas não suspensas ($m_{p,i}$). Assim como no modelo anterior, a ligação entre essas massas é feita por meio das suspensões formadas pelo conjunto mola-amortecedor ($k_{v,i}$ e $c_{v,i}$) e as massas não suspensas se apoiam no pavimento da estrutura através do conjunto mola-amortecedor ($k_{p,i}$ e $c_{p,i}$) equivalente aos pneus.

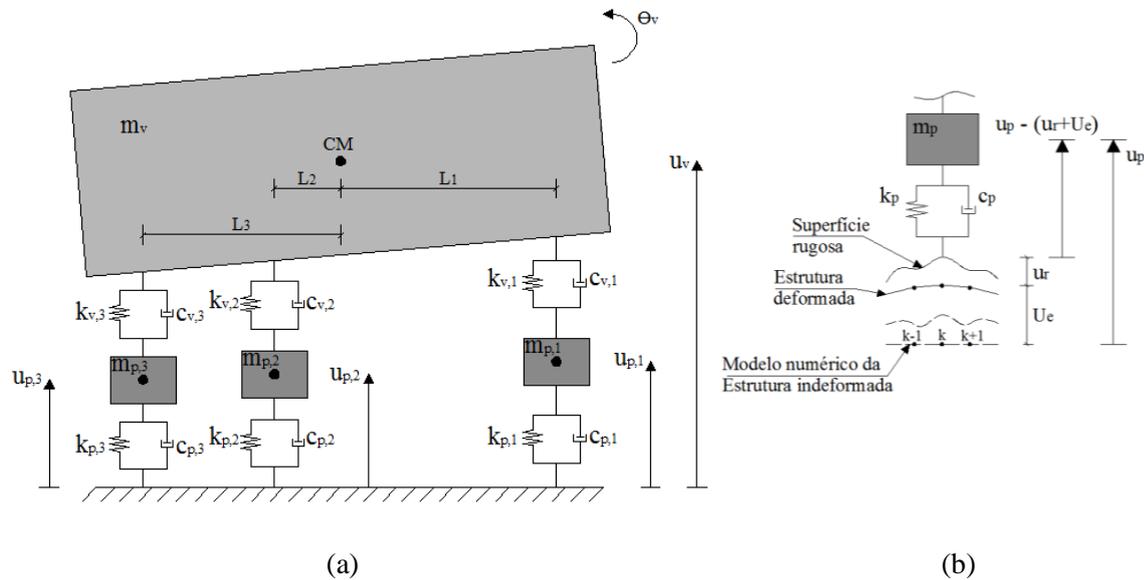


Figura 3. (a) Modelo mecânico plano para veículo de três eixos; (b) Sistema mecânico-estrutural de um eixo do veículo 3C; adaptado de MENDONÇA (2009)

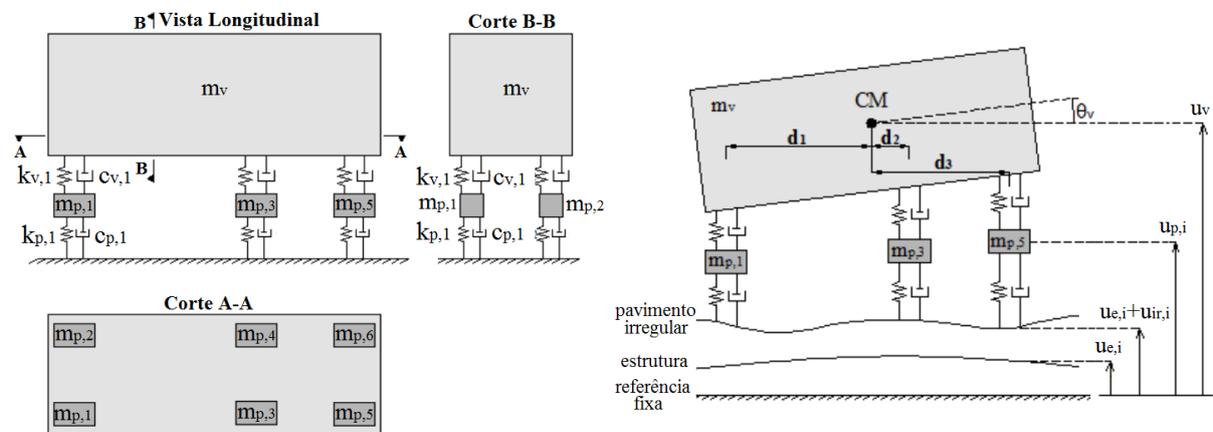


Figura 4. Modelo mecânico tridimensional do veículo de três eixos (SANTOS, 2013)

Para a descrição das irregularidades do pavimento (u_r) foi utilizado o espectro de rugosidade ajustado experimentalmente por HONDA et al. (1982), expresso por:

$$S(\omega_k) = \bar{\alpha}(\omega_k)^{-\beta} \quad (1)$$

onde $\bar{\alpha}$ é o coeficiente espectral de rugosidade que depende do estado de conservação do pavimento; e β é o expoente de rugosidade do espectro que depende do material que constitui o pavimento, tomado igual a 2,03 por HONDA et al. (1982) como o valor médio quando se trata de pavimentos asfáltico e igual a 1,85 para pavimento em concreto.

Para levar em consideração a área de contato do pneu, a cada posição ao longo do percurso, o valor da amplitude do perfil rugoso do pavimento (u_r), ver Figura 3 (b), foi tomado igual à média aritmética do perfil de rugosidade gerado na largura de contato, resultando em uma suavização deste perfil.

No modelo unifilar as equações modais de movimento podem ser escritas, para o j -ésimo modo de vibração da estrutura, conforme a equação (2):

$$m_{ej} \ddot{u}_{ej} + c_{ej} \dot{u}_{ej} + k_{ej} u_{ej} = \phi_{jk} F_{ei} \quad (2)$$

onde m_e , c_e e k_e correspondem aos parâmetros modais de massa, amortecimento e rigidez respectivamente associados ao modo j e ϕ_{jk} é a componente do autovetor j no ponto k de contato pneu-estrutura. Naturalmente, este ponto k varia ao longo do percurso do veículo em função de sua velocidade.

Para o modelo MEF-3D de casca o sistema de equações de movimento do conjunto veículo-estrutura pode ser escrito na forma matricial como apresentado na equação (3):

$$M \ddot{U} + C \dot{U} + K U = F \quad (3)$$

onde,

U é o vetor composto de dois sub-vetores: $[U_e, U_v]$, sendo U_e , o vetor de deslocamentos nodais da estrutura e U_v o vetor de deslocamentos das massas do veículo;

F é composto do sub-vetor de forças nodais da estrutura F_e e do sub-vetor de forças aplicadas aos componentes do veículo, F_v .

M , C e K são respectivamente as matrizes de massa, amortecimento e rigidez do sistema, que incluem características tanto da estrutura quanto do veículo.

O veículo atua como sistema mecânico excitando a estrutura da ponte quando trafega pela mesma sob determinada velocidade e irregularidade geométrica do pavimento. Em cada ponto de contato do veículo com a estrutura são geradas forças de interação de componentes elástica ($f_{e,i}$) e de amortecimento ($f_{a,i}$), funções do deslocamento relativo entre a massa do eixo considerado (deslocamento u_p) em relação ao ponto de contato com a estrutura (deslocamento U_e) e considerando o perfil rugoso do pavimento (u_r). A força de interação, para cada eixo, pode ser escrita:

$$F_{ei} = f_{ei} + f_{ai} \quad (4)$$

onde,

$$f_{ei} = k_{pi} [u_{pi} - (U_{ei} + u_{ri})] \quad (5)$$

$$f_{ai} = c_{pi} [\dot{u}_{pi} - (\dot{U}_{ei} + \dot{u}_{ri})] \quad (6)$$

Foram desenvolvidas ferramentas computacionais para resolver as equações acopladas de movimento do veículo e da ponte no domínio do tempo. Para a metodologia unifilar, é utilizado o método da superposição modal (CLOUGH e PENZIEN, 1993), sendo o sistema de equações de movimento transformado em n equações desacopladas e resolvido por integração numérica via método de Runge-Kutta. Já para outra metodologia o sistema de equações é escrito na forma matricial e resolvido através da integração direta com esquema de Newmark.

O sistema de equações de movimento acopladas do sistema mecânico-estrutural, para o método unifilar, pode ser encontrado em ARAUJO (2014), assim como a composição detalhada das matrizes e dos vetores, para o modelo MEF-3D de casca, podem ser encontradas no trabalho de SANTOS (2013).

3 CASO EXEMPLO

3.1 Estrutura e Veículo

Os métodos analítico-numéricos foram aplicados ao caso exemplo de uma ponte típica que representa grande parte das obras de arte em concreto armado nas rodovias federais brasileiras. A Figura 5 mostra a seção transversal da ponte analisada que consta de uma laje associada a duas longarinas de seção retangular constante. A estrutura considerada é bi-apoiada, com vão livre de 10 m, e possui quatro transversinas.

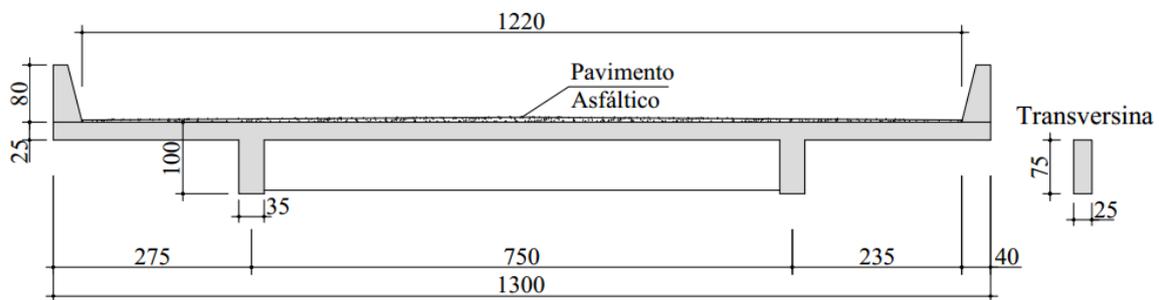


Figura 5. Seção transversal da ponte bi-apoiada com 10 m de vão (unidades em cm)

O veículo e suas especificações técnicas foram adotados com base nos estudos apresentados por ROSSIGALI (2006 e 2013), os quais mostram que o veículo mais frequente nas rodovias brasileiras é o caminhão com três eixos (3C), com dimensões geométricas médias conforme esquema apresentado na Figura 6. Os estudos apresentam ainda a distribuição do peso total suportado por cada grupo de eixos do veículo; para o caso em questão o eixo dianteiro recebe 27% da carga e os eixos traseiros 73%.

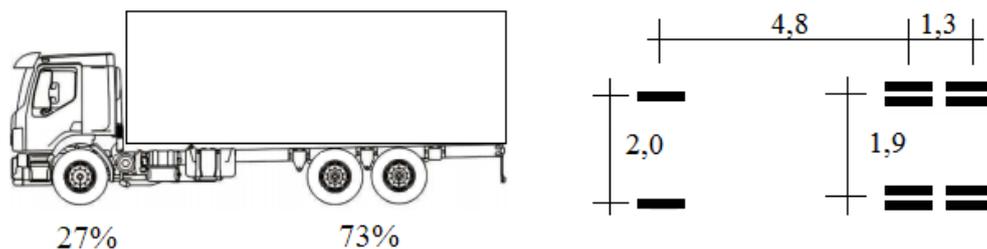


Figura 6. Desenho esquemático do caminhão de três eixos

Os valores considerados para os parâmetros de rigidez e amortecimento do modelo do caminhão (pneu e suspensão) foram adotados segundo padrões da literatura (GILLESPIE et al., 1992 apud MELO, 2007), e estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros adotados para o modelo do veículo de três eixos

Parâmetro	Eixo	Valor adotado
$m_{p,i}$	Dianteiro	0,635 t
$m_{p,i}$	Traseiro	1,066 t
$c_{p,i}$	Dianteiro	2,0 kNs/m
$c_{p,i}$	Traseiro	4,0 kNs/m
$k_{p,i}$	Dianteiro	1680 kN/m
$k_{p,i}$	Traseiro	3360 kN/m
$c_{v,i}$	Dianteiro	6,0 kNs/m
$c_{v,i}$	Traseiro	12,0 kNs/m
$k_{v,i}$	Dianteiro	580 kN/m
$k_{v,i}$	Traseiro	1180 kN/m

3.2 Modelos

Foram desenvolvidos os modelos em elementos finitos 3D da superestrutura para a aplicação e comparação dos métodos. O modelo MEF-3D de casca (Figura 7(a)), por ser mais completo, foi utilizado como referência na calibração do modelo de grelha (Figura 7(b)) em relação a sua rigidez e frequências naturais de vibração.

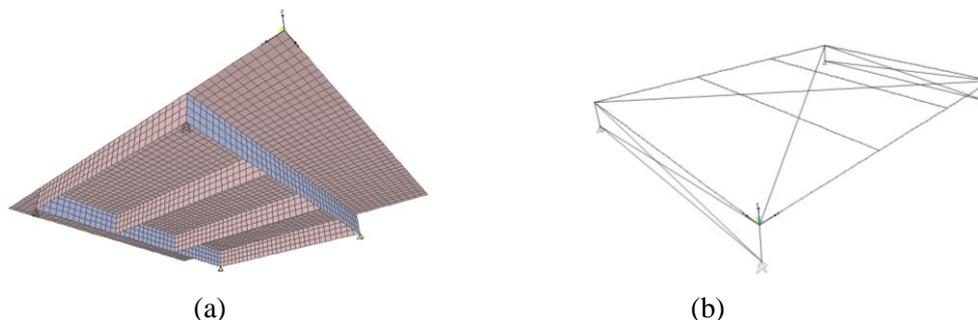


Figura 7. (a) Modelo em MEF-3D de casca e (b) Modelo de grelha da ponte

No modelo tridimensional de grelha as longarinas e transversinas foram modeladas com elementos de pórtico espacial em seção T (Figura 8), considerando a laje do tabuleiro como parte integrante das mesas. As larguras efetivas das longarinas foram calculadas a partir da distribuição das tensões normais das lajes (do modelo MEF-3D de casca) e das transversinas foram calculadas de acordo com a NBR 6118 (2007).

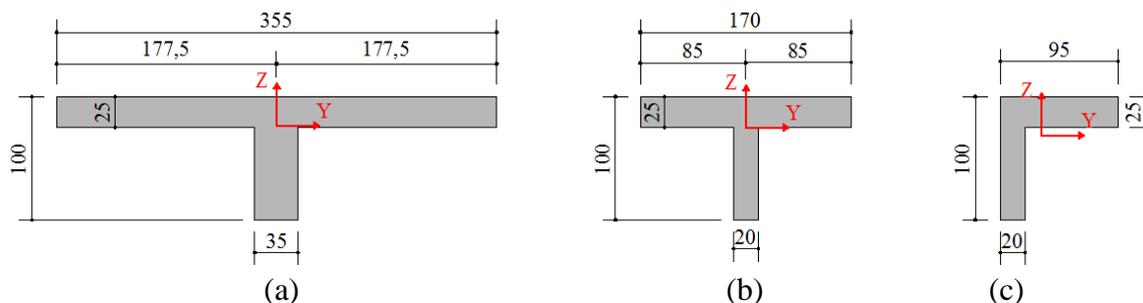


Figura 8. Seções transversais dos elementos de barra utilizados no modelo de grelha (unidades em cm): (a) longarina; (b) transversinas intermediárias; (c) transversinas de apoio.

Para que as mesmas propriedades de rigidez do modelo de casca fossem simuladas foram acrescentados travejamentos horizontais diagonais no modelo de grelha, para representar a grande rigidez da laje em seu próprio plano, impedindo as deformações cisalhantes entre longarinas (já que a rigidez das transversinas normalmente não é suficiente para isso). Além disso, foi considerada a devida excentricidade vertical do apoio em relação ao centro de gravidade das longarinas, com travejamentos diagonais no plano vertical das transversinas de apoio.

Os travejamentos foram modelados com elementos de barra de grande rigidez axial e sem peso próprio. As diagonais horizontais equivalentes ao painel do tabuleiro compreendido entre as longarinas e transversinas ligadas a laje foram dimensionadas por meio de expressões analíticas para cálculo da área das diagonais equivalentes (MOREIRA, 2002). Para que essa metodologia apresente o resultado esperado as diagonais devem possuir inclinações compreendidas entre 40° e 50° , sendo 45° o valor ideal.

Foram calculadas as massas equivalentes e momentos de inércia de massas das regiões que não foram modeladas estruturalmente, como partes do tabuleiro, guarda-rodas e pavimento asfáltico, conforme cada modelo. Os valores encontrados foram aplicados a estrutura modelada. Como condição de contorno, todos os graus de liberdade referente às translações, para ambos os modelos, foram restringidos nos nós inferiores das extremidades das longarinas, representando assim o caso de viga bi-apoiada.

3.3 Análise Estática

Foram comparados resultados de carregamentos estáticos para garantir que as mesmas propriedades de rigidez estejam sendo simuladas nos modelos apresentados. As respostas em termos de deslocamento no meio do vão longitudinal foram obtidas para a passagem do veículo a 1km/h em duas posições transversais: no meio da largura da ponte (carga centrada) e sobre a longarina L2 (carga excêntrica), como pode ser visto na Figura 9(a) e (b), respectivamente.

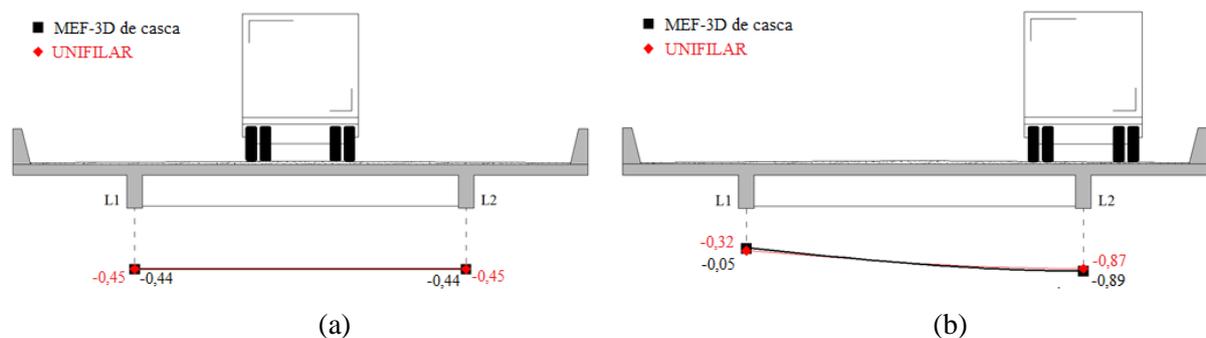


Figura 9. Configuração deformada da seção transversal no meio do vão (a) para carga centrada e (b) para carga excêntrica, valores em mm

A Figura 9 mostra o resultado comparativo em termos de deslocamentos no meio do vão das longarinas L2 e L1 entre os modelos MEF-3D de casca e Unifilar. Pode-se concluir que há uma boa correlação de resultados.

3.4 Análise Modal

Para análise dinâmica é necessário também que as frequências e formas modais dos dois modelos estejam calibradas. Através da análise de vibração livre foram obtidas as

características dos modos fundamentais de vibração da estrutura para cada modelo. As Tabelas 3 e 4 apresentam as frequências naturais e a descrição dos modos associados de forma resumida para o modelo MEF-3D de casca e grelha, respectivamente.

Tabela 3. Frequências naturais da estrutura e modos associados obtidos do modelo MEF-3D de casca

Modo de vibração	Frequência modal (Hz)	Descrição do modo
1°	8,37	Torção das lajes em balanço com participação das longarinas
2°	8,63	Flexão vertical das lajes em balanço com participação das longarinas
3°	11,85	Flexo-torção das lajes em balanço
4°	11,86	Flexão das lajes em balanço
5°	12,61	Flexão vertical do tabuleiro (uma meia onda)
6°	16,77	Flexo-torção das abas com participação das longarinas
7°	18,29	Flexão das lajes em balanço e transversinas
8°	20,62	Torção das transversinas intermediárias e flexão vertical das longarinas
9°	24,51	Torção do tabuleiro

Tabela 4. Frequências naturais da estrutura e modos associados obtidos do modelo de grelha

Modo de vibração	Frequência modal (Hz)	Descrição do modo
1°	13,49	Flexão vertical do tabuleiro
2°	15,03	Torção do tabuleiro
3°	16,57	Flexão das longarinas e transversinas
4°	19,24	Torção das transversinas de apoio
5°	19,95	Flexão das transversinas de apoio com participação das longarinas
6°	23,08	Torção das transversinas
7°	23,35	Torção do tabuleiro
8°	24,36	Flexo-torção do tabuleiro

Observa-se que algumas formas modais apresentam-se puras de flexão vertical ou torção do tabuleiro e outras mistas, de flexo-torção. Porém, no modelo MEF-3D de casca, vê-se também a proeminente participação das lajes em balanço e entre longarinas em flexão transversal em todas as formas modais, as quais não são representadas no modelo de grelha.

Devido a isto, neste último modelo não aparecem as quatro primeiras frequências de vibração natural da estrutura conforme o modelo de referencia. Sobre tudo, foi possível representar no modelo unifilar os principais modos de flexão vertical e torção da estrutura modelada com elementos de casca; a correlação de frequências está resumida na Tabela 5.

Tabela 5. Correlação das frequências associadas aos principais modos de flexão e torção entre modelo de grelha e MEF-3D

Modo de vibração	Frequência (Hz)	
	Modelo MEF-3D	Modelo Grelha
Flexão	12,61	13,49
Torção	16,77	15,03
Flexão	-	16,57
Torção	24,50	23,35

Na Figura 10 apresentam-se os dois primeiros modos fundamentais de vibração da estrutura, flexão e torção respectivamente, para cada modelo.

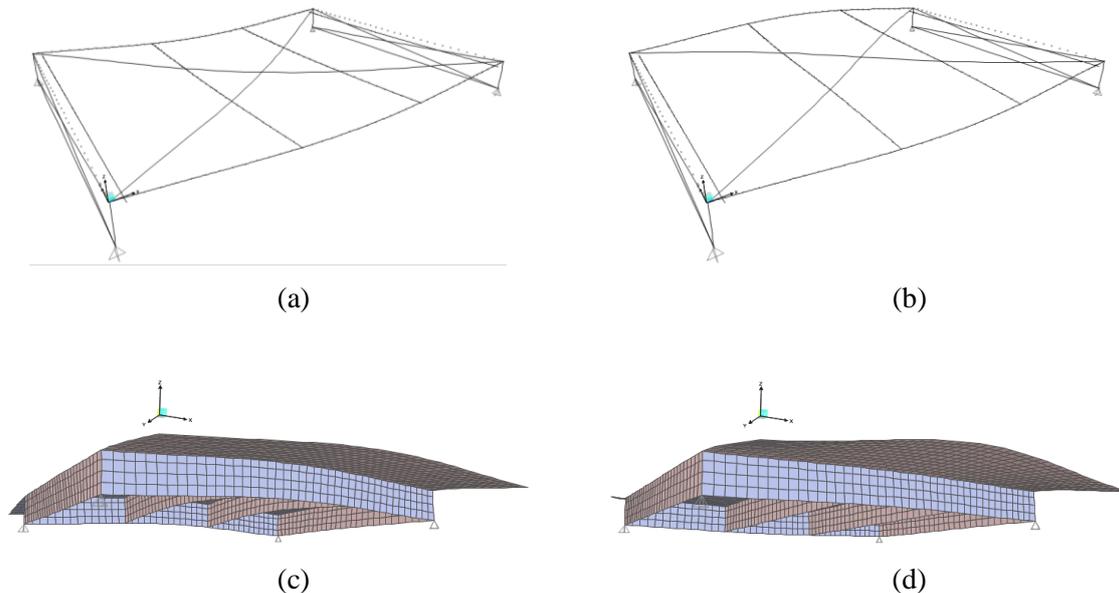


Figura 10. (a) 1º modo de flexão do modelo de grelha, frequência=13,49Hz; (b) 1º modo de torção do modelo de grelha, frequência=15,03Hz; (c) 1º modo de flexão do modelo de casca, frequência=12,61Hz; (d) 1º modo de torção do modelo de casca, frequência=16,77Hz

3.5 Interação Veículo-Estrutura

Foram considerados casos em que o veículo de três eixos trafega a velocidade de 80km/h no centro da faixa de rolamento da ponte com duas longarinas com diferentes condições de pavimento. Perfis de rugosidade do pavimento classificados como bom e mau estado foram considerados conforme a escala de classificação de irregularidades do pavimento adotada no Brasil (IRI - *International Roughness Index*). As respostas foram apresentadas de forma típica em função da posição longitudinal do eixo dianteiro do veículo, devido a este formato permitir a comparação entre as respostas para diferentes velocidades.

- Correlações para variação de rugosidade e ressalto:

As respostas foram observadas em termos de deslocamento no meio do vão da longarina L1 (ver Figura 9). Na Figura 11 apresentam-se os resultados para ponte sem a consideração da presença do pavimento rugoso. Já na Figura 12 foi considerado o pavimento em bom estado, e conforme literatura o valor de $\bar{\alpha}$ foi adotado igual a $0,5(\times 10^{-6} \text{m}^2/(\text{m}/\text{ciclo}))$ e β igual 2,03. Observa-se na Figura 13 a grande alteração na resposta devido à presença de um ressalto de 30 mm e o pavimento asfáltico ($\beta = 2,03$) em mau estado de conservação ($\bar{\alpha} = 1,50,5(\times 10^{-6} \text{m}^2/(\text{m}/\text{ciclo}))$). Na Tabela 6 encontra-se um resumo dos valores das amplitudes de deslocamentos máximos para cada modelo.

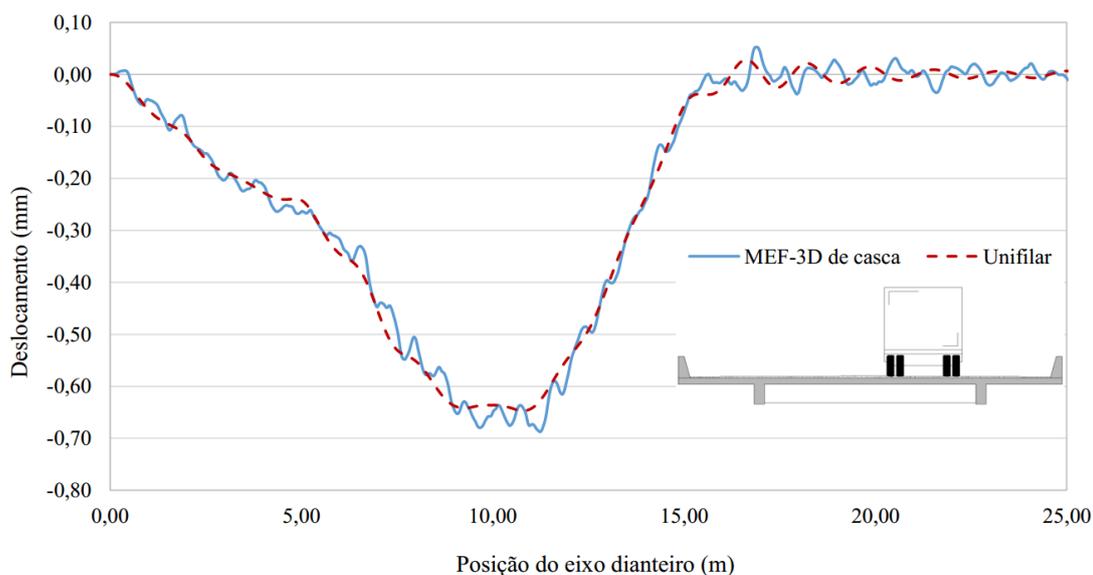


Figura 11. Correlação dos deslocamentos no meio do vão da longarina para veículo trafegando a 80 km/h sem a presença do pavimento

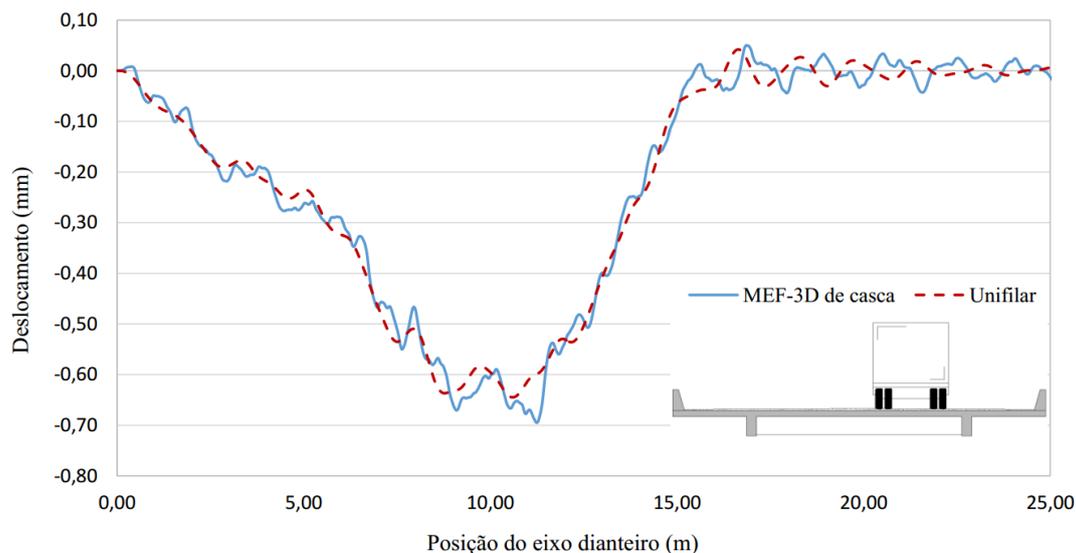


Figura 12. Correlação dos deslocamentos no meio do vão da longarina para veículo trafegando a 80 km/h sobre pavimento em bom estado

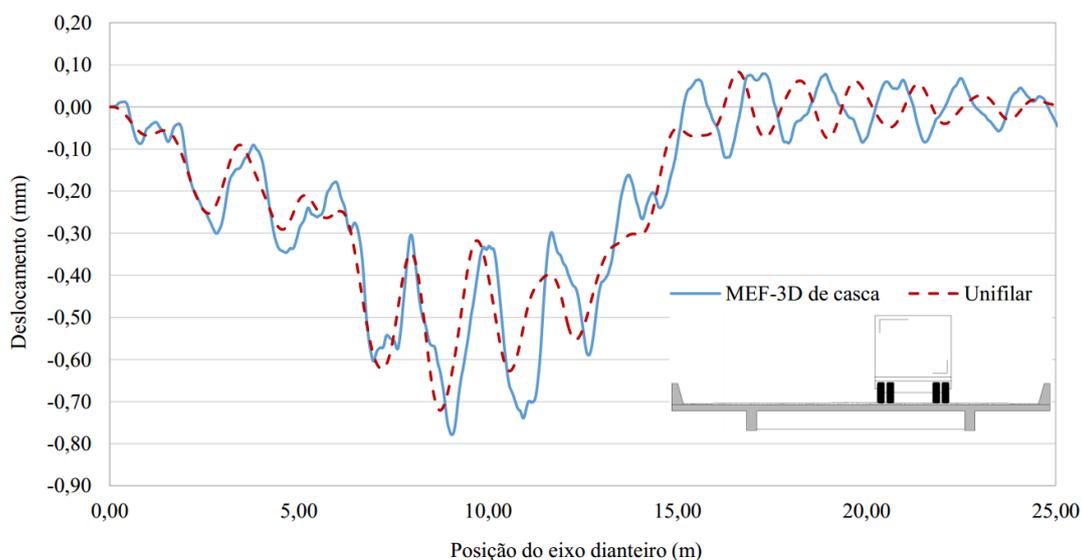


Figura 13. Correlação dos deslocamentos no meio do vão da longarina para veículo trafegando a 80 km/h sobre pavimento em mau estado com ressalto de 30 mm na cabeceira da ponte

Tabela 6. Comparação das amplitudes de deslocamentos máximas da longarina, durante a passagem do veículo 3C a 80 km/h com variação de rugosidade

Condição do pavimento	Amplitude máxima (mm)		ERRO (%)
	Modelo MEF-3D	Modelo Grelha	
Sem	-0,688	-0,647	5,96
Bom	-0,695	-0,645	7,19
Mau + ressalto	-0,779	-0,721	7,45

Pode-se observar através das Figuras 14 a 19 os gráficos de flutuações das respostas dinâmicas em torno da estática, para cada metodologia, dos casos analisados neste item.

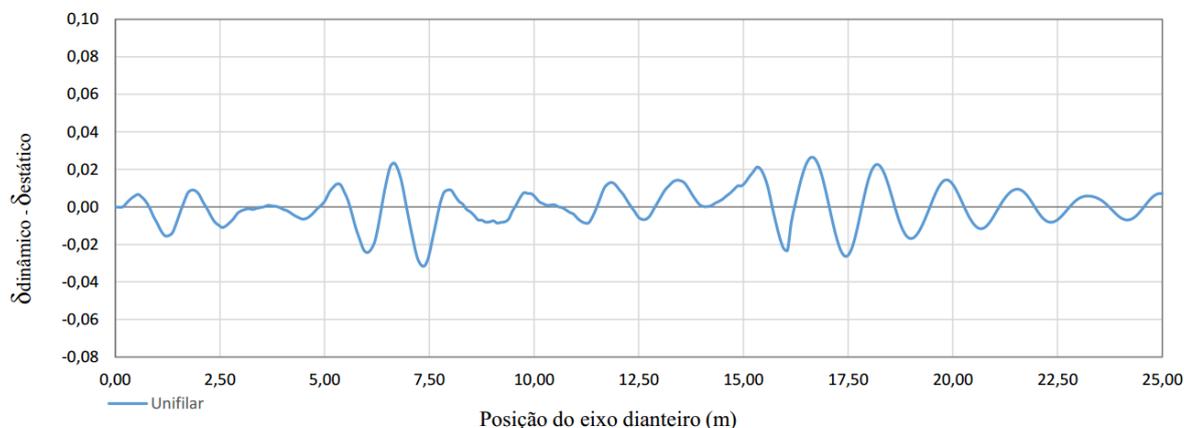


Figura 14. Flutuações da resposta dinâmica, apresentada pelo modelo unifilar, em torno da estática no meio do vão da longarina para veículo trafegando a 80 km/h sem a presença do pavimento

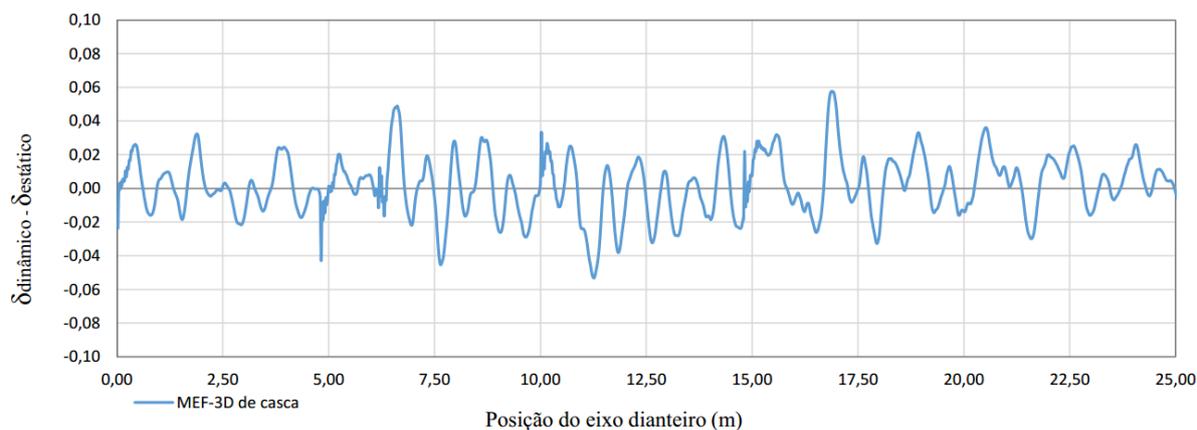


Figura 15. Flutuações da resposta dinâmica, apresentada pelo modelo MEF-3D de casca, em torno da estática no meio do vão da longarina para veículo trafegando a 80 km/h sem a presença do pavimento

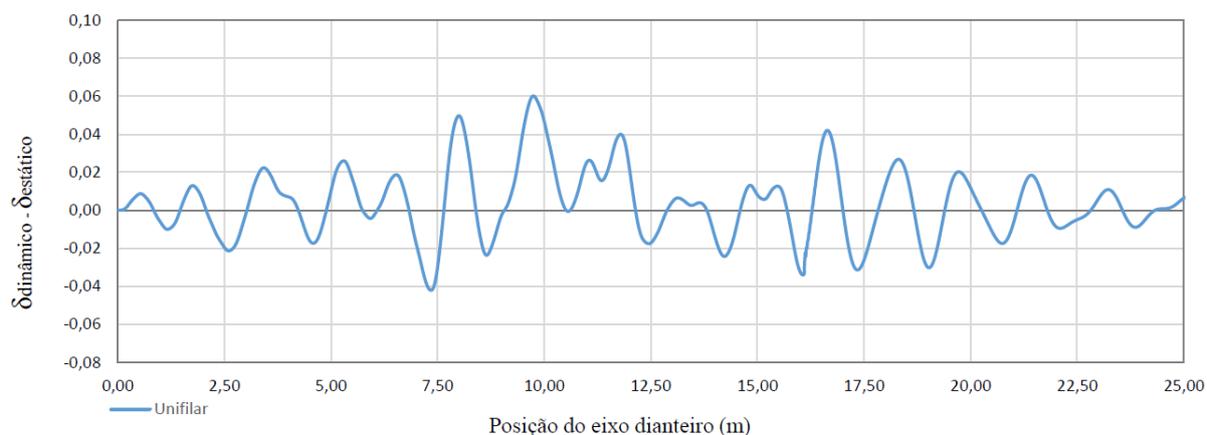


Figura 16. Flutuações da resposta dinâmica, apresentada pelo modelo unifilar, em torno da estática no meio do vão da longarina para veículo trafegando a 80 km/h sobre pavimento em bom estado

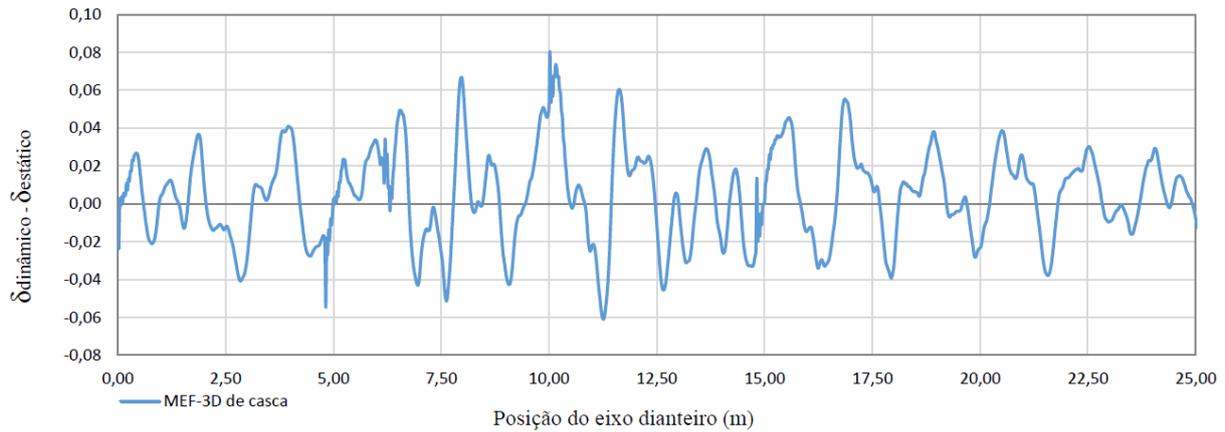


Figura 17. Flutuações da resposta dinâmica, apresentada pelo modelo MEF-3D de casca, em torno da estática no meio do vão da longarina para veículo trafegando a 80 km/h sobre pavimento em bom estado

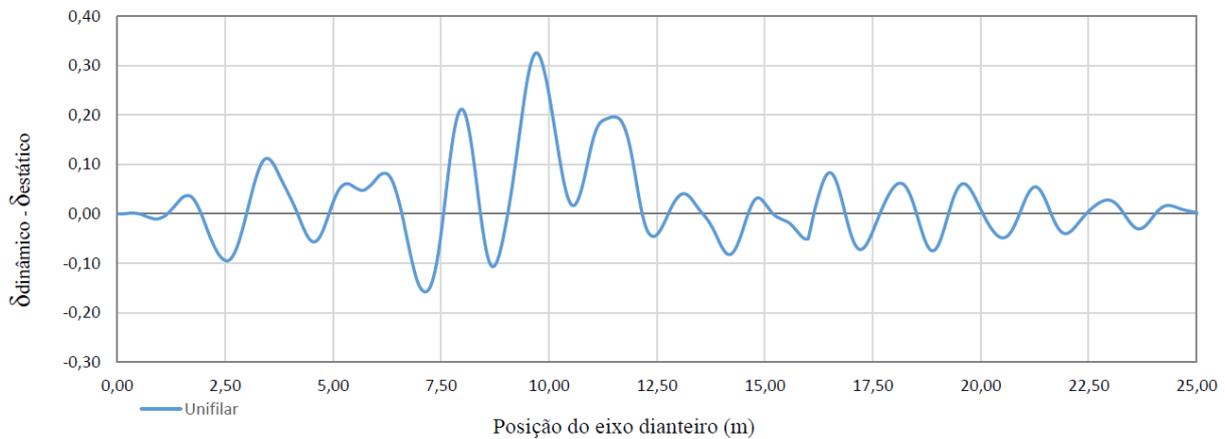


Figura 18. Flutuações da resposta dinâmica, apresentada pelo modelo unifilar, em torno da estática no meio do vão da longarina para veículo trafegando a 80 km/h sobre pavimento em mau estado com ressalto de 30mm na cabeceira da ponte

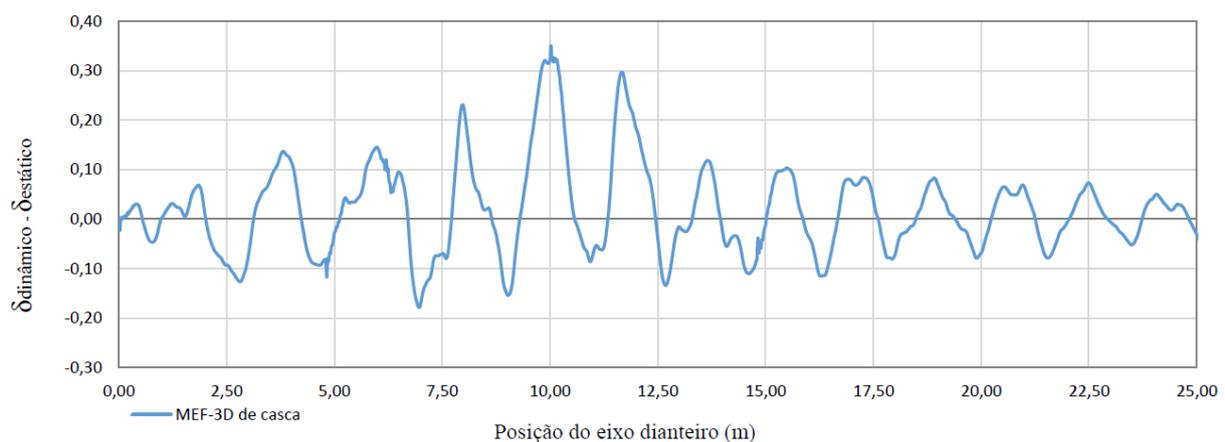


Figura 19. Flutuações da resposta dinâmica, apresentada pelo modelo MEF-3D de casca, em torno da estática no meio do vão da longarina para veículo trafegando a 80 km/h sobre pavimento em mau estado com ressalto de 30mm na cabeceira da ponte

- Análise dos resultados das correlações:

As respostas do modelo unifilar apresentam oscilações em torno da resposta quase-estática apenas na frequência do 1º modo (flexão vertical) enquanto a resposta do modelo MEF-3D de casa exibe oscilações em várias frequências além desta, associadas a modos de flexão transversal das lajes (principalmente aquela em balanço), as quais não podem ser representadas pelo modelo unifilar. Mesmo assim os valores máximos das respostas das duas modelagens são bastante similares.

4 CONCLUSÕES

Apresentou-se a comparação de resultados obtidos através de dois modelos analítico-numéricos para interação dinâmica veículo-pavimento-estrutura. Um em que se utiliza uma modelagem simplificada, na qual a estrutura é representada por um modelo numérico unifilar e a solução é modal e outro em que o tabuleiro é modelado em elementos finitos de casca sendo a solução efetuada em coordenadas nodais, resultando assim em uma modelagem mais refinada.

O estudo buscou estabelecer as condições para as quais a solução com o modelo unifilar pode ser adotada como representativa da modelagem mais refinada. Tendo em vista que o modelo simplificado é, naturalmente, mais eficiente em termos de tempo de processamento e ainda possibilita a obtenção de forma direta dos esforços seccionais nas longarinas e transversinas.

A comparação foi efetuada a partir dos resultados obtidos para as modelagens de uma ponte em concreto armado com duas longarinas sob a passagem de um veículo típico em diferentes condições de pavimento e possibilidade de ressalto na entrada da estrutura. Verificou-se que o modelo unifilar reproduziu bem o comportamento do modelo refinado em termos de deslocamento máximo, apesar de não representar em suas formas modais os movimentos de flexão das lajes do tabuleiro presentes no modelo refinado. Pode-se concluir que a boa correlação entre as metodologias depende da devida calibração do modelo de grelha em termos das propriedades de rigidez e massa da estrutura com relação ao modelo em elemento de casca.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, 2013, NBR 7188 - *Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT, 2003, NBR 7187 – *Projeto de Pontes de Concreto Armado e de Concreto Protendido - Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT, 2007, NBR 6118 – *Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ARAUJO, A. O. , 2014, *Modelos Analítico-numéricos para Interação Dinâmica Veículo-Pavimento-Estrutura de Ponte Rodoviária*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- BARBOSA, F. S., 2000, *Modelagem Computacional de Estruturas com Camadas Viscoelásticas Amortecedoras*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BATTISTA, R. C., PFEIL, M. S., CARVALHO, E. M. L., 2011, *Vehicle-Structure interaction effect on the fatigue life of steel orthotropic decks*. In: 8th International Conference on Structural Dynamics, 2011, Leuven.
- CLOUGH, R. W., PENZIEN, J., 1995, *Dynamics of Structures*. 2 ed. USA, Computers and Structures, Inc.
- FERREIRA, V. T., 1999, *Modelo Simplificado para a Análise Dinâmica de Estruturas Mistas de Pontes*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- GILLESPIE, T. D., KARAMIHAS S. M., CEBON, D., SAYERS, M. W., NASIM, M. A., HANSEN W., EHSAN, N., 1992, *Effects of Heavy Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance*, The University of Michigan Transportation Research Institute, UMTRI 92-2.
- HONDA, H., KAJIKAWA, Y., KOBORI, T., 1982, *Spectra of Road Surface Roughness on Bridges*. *Journal of the Structural Division*, v. 108, ST 9, pp. 1956-66.
- MELO, E. S., 2007, *Interação Dinâmica Veículo-Estrutura em Pequenas Pontes Rodoviárias*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MENDONÇA, R. F., 2009, *Geração de Dados para Modelo Dinâmico de Cargas Móveis em Pontes*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PFEIL, M. S., MENDONÇA, R. F., ROSSIGALI, C. E., BATTISTA, R. C., 2010, *Estudos Probabilísticos para Novo Modelos de Cargas Móveis para Pontes no Brasil*. III Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, RJ, Abril.
- ROSSIGALI, C. E., 2006, *Estudos Probabilísticos para Modelos de Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias no Brasil*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ROSSIGALI, C. E., 2013, *Atualização do Modelos de Cargas Móveis para Pontes Rodoviárias de Pequenos Vãos no Brasil*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SANTOS, E. F., 2007, *Análise e Redução de Vibrações em Pontes Rodoviárias*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SANTOS, C. A. N., BATTISTA, R. C., CORREA, W. L., 2012, *Retro-análise Estrutural para Redução de Vibrações no Viaduto Santos Dias*. In: Anais do V Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas da ABPE, Rio de Janeiro, RJ, junho.
- SANTOS, C. A. N., 2013, *Retro-análise de Estrutura de Pontes por meio de Técnicas Teórico-Numérico-Experimental*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SANTOS, C. A. N., PFEIL, M. S., BATTISTA, R. C., 2013, “*Retro-analysis of an urban bridge through theoretical - numerical - experimental technique*”. In: EVACES 2013 - Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, Ouro Preto, MG.