



Estimativa de Esforços Extremos em Pontes Para Modelo Dinâmico de Cargas Móveis No Brasil

Hugo Campêlo Mota¹, Michèle Schubert Pfeil², Carlos Rossigali³

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto COPPE / hugocmota8@gmail.com

² Universidade Federal do Rio de Janeiro- Escola Politécnica – COPPE / mpfeil@coc.ufrj.br

³ Universidade Federal do Paraná / carlos.rossigali@ufpr.br

Resumo

Modelos de cargas móveis para projeto de pontes que incorporem os efeitos dinâmicos da passagem de veículos pesados em tráfego nas rodovias brasileiras vêm sendo desenvolvidos com vistas à modernização dos procedimentos de projeto. O presente trabalho se insere neste contexto apresentando o detalhamento da etapa de análise dinâmica da interação veículo-pavimento-estrutura cujo objetivo é a determinação de esforços extremos, a serem posteriormente adotados como valores alvo no procedimento de busca de novos modelos de carga móvel. Foram escolhidos sistemas estruturais de pontes em grelha com duas longarinas com vãos de comprimento entre 10 e 40m. As pontes analisadas têm três tipos de esquema estrutural: biapoiado com único vão, dois vãos contínuos e viga com dois balanços entre 2,5 e 10m e vão central. Em trabalhos anteriores foram obtidas as configurações de veículos reais que produzem os maiores esforços estáticos nas estruturas. Para a passagem destas configurações apresenta-se aqui a determinação das respostas dinâmicas em termos de deslocamentos da estrutura representada por um modelo unifilar construído a partir de um modelo numérico de grelha. Os históricos de amplitudes modais obtidos desta análise dinâmica são então aplicados às formas modais do modelo de grelha para determinar os esforços solicitantes dinâmicos máximos para várias situações de carregamento. Conclui-se que para alguns casos estes esforços são maiores do que aqueles obtidos a partir do modelo de carregamento prescrito na NBR7188-2013.

Palavras-chave

Esforços em pontes; Modelo de cargas Móveis; Análise dinâmica.

Introdução

O modelo de carga móvel adotado na norma brasileira NBR7188/2013 guarda a configuração do modelo vigente à época em que o cálculo de pontes e viadutos eram feitos com auxílio de tabelas. Este modelo, denominado de trem tipo, vem sendo revisado em termos de magnitude das cargas e expressões para o fator de impacto. É preciso, entretanto, que se garanta que os modelos de cargas móveis adotados em um projeto conduzam a esforços solicitantes compatíveis com os efeitos dinâmicos externos gerados pela passagem de veículos pesados que trafegam nas rodovias brasileiras.

O rebaixamento das placas de transição de pontes devido a falta de manutenção ou aumento das cargas previstas em projeto, bem como a rugosidade causada pela deterioração do pavimento, provocam, com o passar do tráfego real, vibrações nas pontes gerando esforços dinâmicos. No caso de pontes com pequenos vãos (10 a 40m) já foi demonstrado por ROSSIGALI (2013) que essas vibrações podem ser excessivas provocando esforços não previstos em projeto, em destaque a situação da passagem de veículos pesados em pontes com balanços. Evidencia-se, portanto, a necessidade de atualização do modelo empregado para cargas móveis nestas situações específicas.

O desenvolvimento de modelos de cargas móveis no contexto da presente pesquisa inclui as seguintes etapas (ROSSIGALI, 2013): (1) elaboração de base de dados de veículos pesados a partir de medições de pesagem em movimento; (2) seleção de sistemas estruturais representativos de pontes existentes na malha rodoviária brasileira e dos tipos de esforços em seções críticas; (3) simulação de tráfego em situações de fluxo livre, misto e engarrafamentos e determinação de esforços estáticos máximos; (4) extrapolação dos efeitos do tráfego real de veículos nas pontes, calculados para um determinado período de retorno; (5) análise dinâmica da passagem das configurações de veículos que conduzem aos esforços extremos calculados estaticamente; (6) busca, por processos de otimização, de novos modelos de carga, compostos de forças concentradas e distribuídas, que possam de fato reproduzir os efeitos do tráfego real; (7) calibração de coeficientes de segurança, para ações e resistências, via análise de confiabilidade estrutural das pontes consideradas, de forma a garantir uma margem de segurança consistente e uniforme para todas as estruturas.

Grande parte das etapas citadas foi realizada por ROSSIGALI (2013) com aplicação a pontes com duas longarinas em estruturas de pontes biapoiadas e contínuas com vãos de 10m, 20m, 30m e 40m, e com balanços com 2,5m, 5m, 7,5m, e 10m. Para estes mesmos sistemas, o presente trabalho explora o tema da etapa (5) anteriormente mencionada e compara os resultados obtidos em termos de esforços extremos aos obtidos por meio do modelo de carga da NBR7188/2013.

Estruturas Analisadas e Esforços Analisados

Foram analisadas pontes em seção PI em concreto armado com transversinas intermediárias e em apoios não ligadas à laje, tipologias que aparece com grande frequência nas rodovias brasileiras. A seção transversal é mostrada na Figura 1.

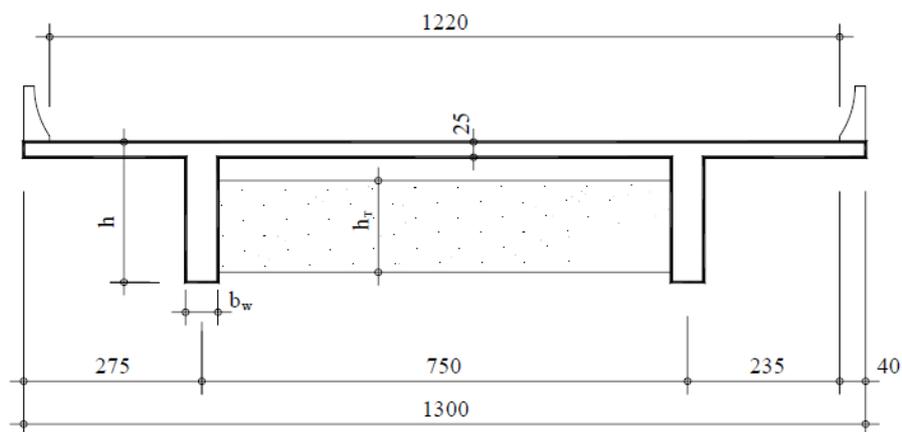


Figura 1 – Seção Transversal de ponte com duas longarinas.

Para as estruturas biapoiadas foram analisados os esforços cortantes máximos próximos aos apoios e momentos fletores máximos no meio do vão. Para as estruturas em balanço foram analisados o esforço cortante e momento fletor próximos aos apoios. Por fim para as estruturas contínuas além do momento fletor máximo no meio de um dos vãos e o esforço cortante máximo próximo ao apoio central, foram analisados os momentos fletores máximos negativos. Este esquema de análise é mostrado na figura 2. São mostrados ainda os códigos que serão utilizados para facilitar a identificação das estruturas.

Cód.		TIPO	VÃOS (m)	Cód.
B	Estruturas biapoiada		10	B100
			20	B200
			30	B300
			40	B400
E	Estruturas com balanços		2,5	B25
			5	B50
			7,5	B75
			10	B100
C	Estruturas contínuas		10	C100
			20	C200
			30	C300
			40	C400

Figura 2 – Esforços analisados.

São analisadas doze estruturas distintas sendo quatro biapoiadas denominadas de B100, B200, B300 e B400 com os vãos de 10m, 20m, 30m e 40m respectivamente. Para as estruturas com balanços foi adotada a denominação E25, E50, E75 e E100 para os balanços de 2,5m, 5,0m, 7,5m, e 10m respectivamente. As últimas quatro são estruturas contínuas com vãos de 10m, 20m, 30m e 40m, denominadas de C100, C200, C300 e C400 respectivamente.

Os Modelos

Para a análise dos efeitos da interação veículo-pavimento-estrutura utiliza-se neste trabalho, o modelo unifilar do esquema da figura 3 (c). Este modelo é obtido a partir de um modelo de grelha da estrutura da figura 3 (b) que, por sua vez, é ajustado a um modelo de casca como na figura 3 (a) em termos de rigidez e características dinâmicas. Este ajuste é feito com a utilização de barras enrijecedoras.

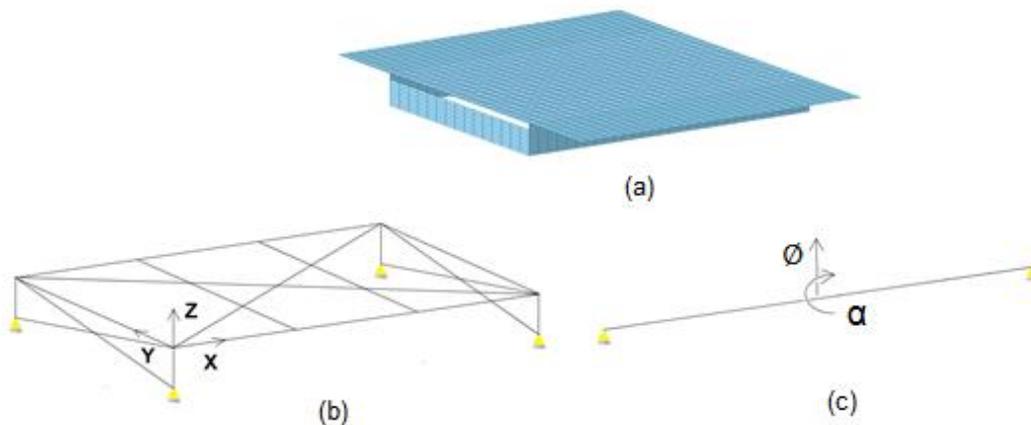


Figura 3 – Modelos Matemáticos.

O modelo de casca é composto apenas por elementos finitos de casca, já o modelo de grelha, utiliza apenas elementos de barra enquanto que no modelo unifilar são representados apenas os modos de vibração de flexão vertical e os modos de torção. Com a finalidade de identificação de um modelo matemático utilizam-se os sufixos “C” para modelos de Casca, “B” para modelos de barras e “U” para modelos unifilares. Portanto como exemplo o modelo unifilar em balanço com 7,5m de vão pode ser identificado, simplesmente como E75-U.

Os Veículos

Os veículos adotados para as análises das pontes são caminhões com três eixos, ou seja, um veículo equivalente às situações de esforços máximos estáticos encontrados por ROSSIGALI (2013). A tabela 1 mostra essa equivalência de veículos para B100. A Figura 4 mostra o esquema matemático do veículo equivalente enquanto que a Figura 5 mostra a base de dados de veículos pesados utilizada. Os valores utilizados para rigidez e amortecimento são os mesmos utilizados por ARAUJO (2014) e seguem padrões da literatura.

Tabela 1 – Veículo Equivalente para B100.
VEÍCULO EQUIVALENTE

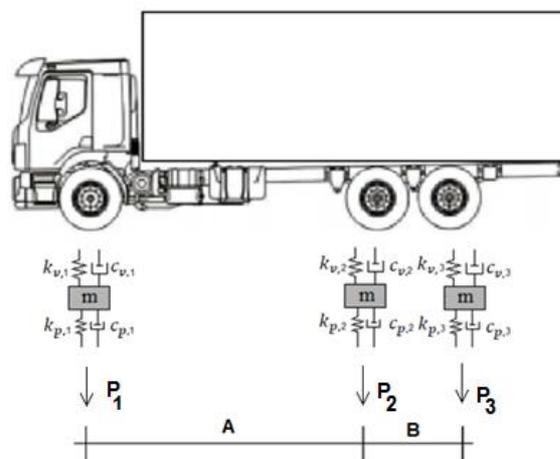
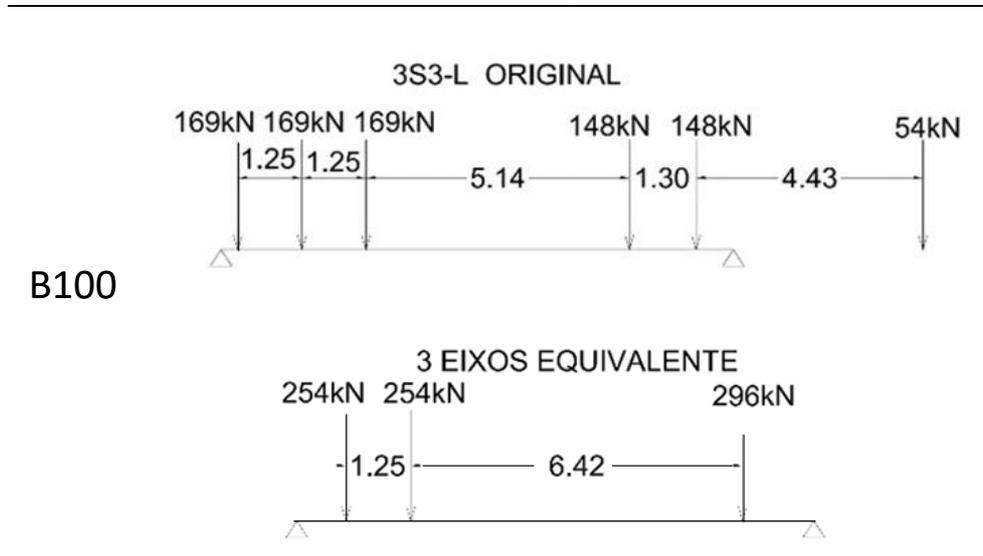


Figura 4 – Modelo do Veículo.

As situações de tráfego analisadas relativas à posição do veículo na seção transversal foram duas, a primeira com o veículo trafegando centrado à ponte e a segunda com o veículo trafegando com seu centro de gravidade acima de uma das longarinas, favorecendo assim a excitação dos modos de torção.

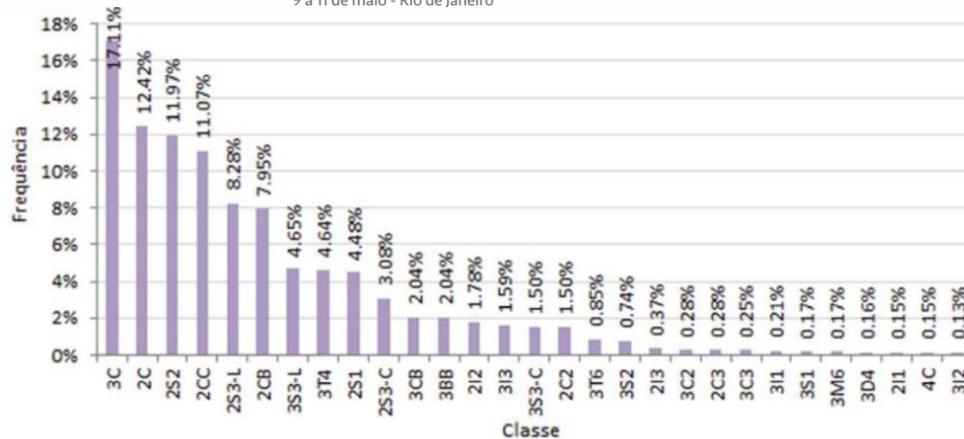


Figura 5 – Base de dados de Veículos pesados ROSSIGALI (2013).

A velocidade simulada com que o veículo trafega variou desde 1,0 km/h situação para comparação com resultados estáticos e 120 km/h com valores intermediários variando de 20 em 20 km/h.

Modelagem da interação Veículo-Pavimento-Estrutura

Ao trafegar sobre a estrutura da ponte, o veículo a excita através de sua atuação como um sistema mecânico. Esta excitação é provocada pelo movimento vertical das massas suspensas, cujo movimento vertical é induzido pelas irregularidades geométricas do pavimento, por ressaltos no início da ponte e pelo próprio movimento da estrutura. Na Figura 6 se pode ver um esquema do sistema mecânico-estrutural onde u_r é a rugosidade do pavimento e U_e é a deformação da estrutura. Para cada eixo do veículo são geradas forças de interação e de amortecimento, e as funções de movimento da massa m_p considerados em relação à posição deformada da estrutura. Os pavimentos foram considerados rugosos e com uma diferença de altura de 3,0 cm na entrada da ponte para simular o rebaixamento da placa de transição.

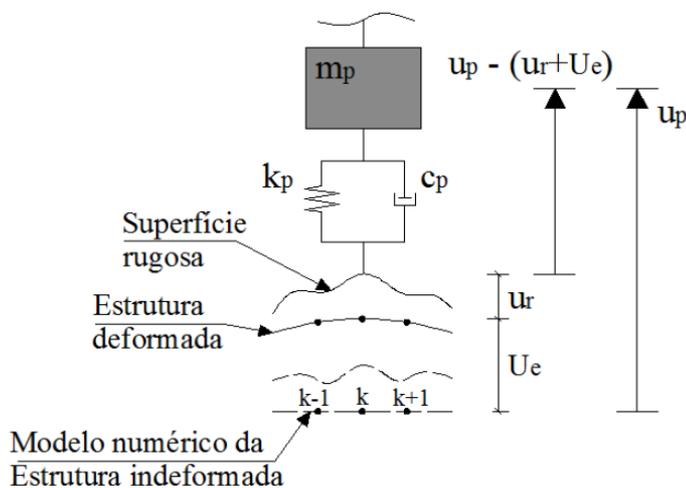


Figura 6 – Sistema mecânico-estrutural de um eixo do veículo 3C.

Seqüência de Análise

Para a análise foram utilizados o programa os programas IVPE e IVPEGRELHA desenvolvidos por MELO(2007), ARAUJO(2014) E MOTA (2017). O IVPE simula a interação veículo- pavimento-estrutura com a utilização de uma modelo unifilar, já o programa IVPEGRELHA é capaz de a partir de amplitudes modais e autovetores modais, calcular os esforços em uma estrutura.

A seqüência lógica que foi empregada neste trabalho segue o fluxograma mostrado na Figura 6 e descrita em seqüência. Primeiramente, se criam modelos matemáticos com elementos bidimensionais e unidimensionais de comportamento 3D em programas comerciais, onde são obtidos os dados necessários para a criação do modelo unifilar. Esse por sua vez é analisado através do programa IVPE. Com as respostas dinâmicas em termo de deslocamento do modelo unifilar, são obtidos os esforços pelo programa IVPEGRELHA. Para se obter os fatores de amplificação dinâmica (FAD), foram divididos os valores dinâmicos pelo valores estáticos. Foi considerada ainda a superposição modal, segundo a qual o deslocamento da estrutura pode ser calculado como a soma das contribuições do deslocamento de cada modo de vibração da estrutura.

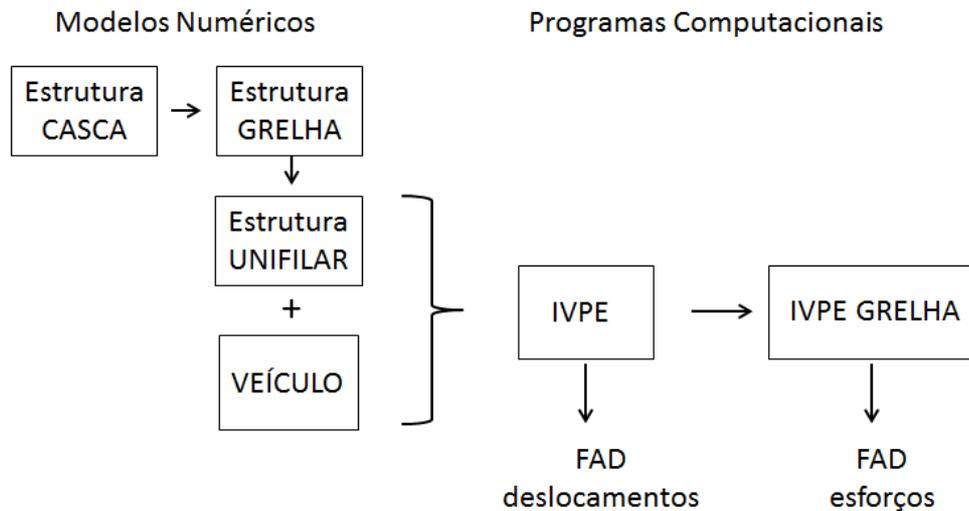


Figura 6 – Fluxograma de Análise.

Resultados e Conclusões

Os resultados dos cálculos dos fatores de amplificação dinâmicos para uma configuração de carregamento, variando apenas a velocidade tráfego do veículo pode ser vista na figura 7.

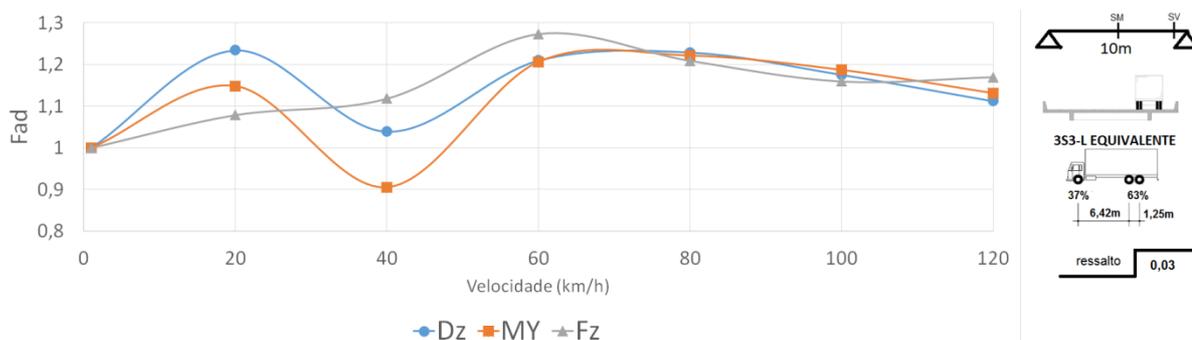


Figura 7 – Fatores de amplificação dinâmica para uma situação de carregamento.

As análises realizadas mostram que os esforços máximos podem ocorrer em situações completamente diferentes. Por exemplo, no caso da Figura 7 a velocidade que provoca o maior esforço cortante no apoio é de 60 km/h, enquanto que para o momento fletor no meio do vão foi de 20 km/h. É claro que os fatores variam com o tipo de estrutura, as características do veículo, a qualidade do pavimento e o desnível na entrada da ponte também influenciam.

As Figuras 8 a 11 apresentam comparativos entre os resultados de momento fletor máximo encontrados com a presente análise (valores alvo) e os resultados encontrados quando são utilizadas as normas NBR7188/1982 e a NBR7188/2013.

Nos casos de momento fletor negativo de pontes com balanço (Fig. 9) e de momento fletor positivo de pontes contínuas (Fig. 10) a norma em vigor conduziu a valores menores que os esforços obtidos neste trabalho, o qual foi realizado com base em dados do tráfego real de veículos. As estruturas com balanços são as que mais divergem dos valores encontrados utilizando a norma em vigor. Em destaque a situação com veículos pesados sendo literalmente lançados para a ponte, por rampas e ou ressaltos na entrada da ponte em balanço. Essa situação provocou esforços dinâmicos até 68% maiores que valores estáticos.

No caso de momento fletor negativo em apoio intermediário de pontes contínuas (Fig. 10) com vãos entre 30 e 40m os resultados obtidos com o modelo vigente produziram valores maiores do que os da presente análise e no caso de momento fletor positivo no meio do vão de pontes biapoiadas (Fig. 8) os resultados das duas análises apresentaram boa correlação.

A análise dos resultados para esforços cortantes (não mostrados no artigo) se equipara com tendências das figuras referentes aos momentos fletores, havendo, portanto situações onde os valores encontrados neste trabalho, são maiores que valores da norma vigente.

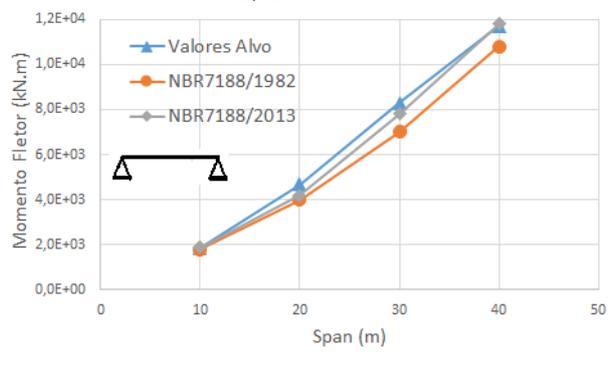


Figura 8 – Comparativo de resultados para momento fletor no meio do vão estruturas biapoiadas.

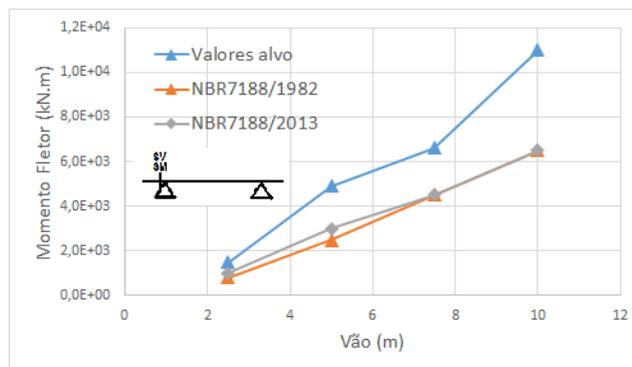


Figura 9 – Comparativo de resultados para momento fletor negativo de estruturas em balanço.

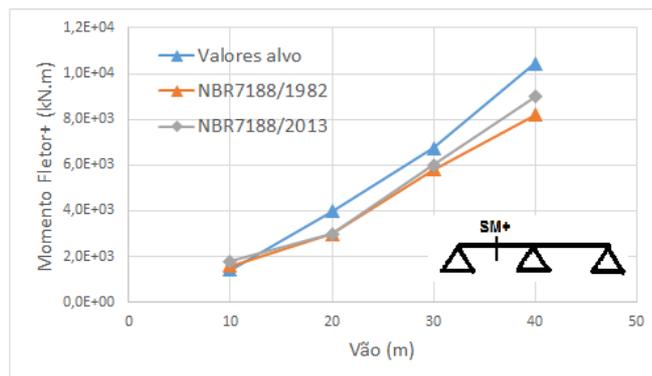


Figura 10 – Comparativo de resultados para momento fletor positivo de estruturas contínuas.

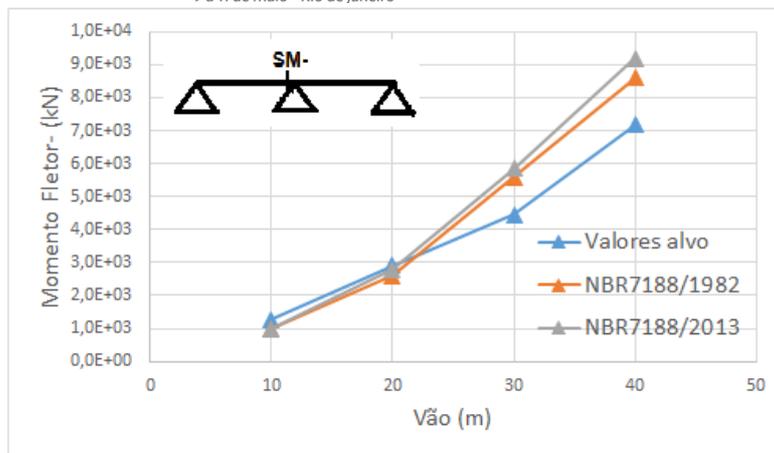


Figura 11 – Comparativo de resultados para momento fletor negativo de estruturas contínuas.

Os valores obtidos neste trabalho, considerando os efeitos dinâmicos, complementam os valores estáticos prévios obtidos de ROSSIGALI *et al.* (2015). Portanto a NBR7188 também pode fornecer valores consideravelmente abaixo dos valores alvos, quando se utiliza uma simulação de tráfego real considerando os possíveis efeitos dinâmicos. Embora sejam específicos para pontes com pequenos vãos de seção PI, esses resultados são relevantes devido a grande quantidade de pontes nas rodovias brasileiras com essas características e apontam para a necessidade de estudos no sentido da revisão do modelo de carga móvel não só para as futuras pontes que serão projetadas, mas também para o projeto de possíveis reforços nas pontes já existentes.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982, NBR-7188 – Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestres. Rio de Janeiro, RJ.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, NBR-7188 – Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestres. Rio de Janeiro, RJ.
- ARAÚJO, A.O, 2014, Modelo Analítico-numérico para interação dinâmica veículo-pavimento-estrutura de ponte rodoviária. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ Brasil.
- MELO, E. S., 2007, Interação dinâmica Veículo-Pavimento-Estrutura em Pequenas Pontes Rodoviárias. Dissertação de Masc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MOTA, H. C., 2017, Esforços extremos em pontes para modelo dinâmico de cargas móveis no Brasil.
- ROSSIGALI, C. E., 2013, Atualização dos Modelos de Cargas Móveis para Pontes Rodoviárias de Pequenos Vãos no Brasil. Tese de D.C.; COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ROSSIGALI, C. E. et al, 2015, Rumo a modelos de cargas reais do tráfego brasileiro para pontes rodoviárias de pequenos vãos, RJ, Revista Ibracon de Estruturas e materiais, v.8, n° 2 pp.124-139.