

Desenvolvimento da Carga Móvel Rodoviária Brasileira para a Vida Útil Ilimitada à Fadiga

Anselmo Leal Carneiro¹, Enson de Lima Portela², Túlio Nogueira Bittencourt³

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé / anselmo.lc@hotmail.com

²Instituto Federal do Ceará / ensondelima@gmail.com

³Universidade de São Paulo - Escola Politécnica / tbitten@gmail.com

Resumo

Este trabalho estuda o modelo de carga móvel utilizado no Brasil para a verificação de fadiga em pontes rodoviárias. Mediante a abordagem de vida útil ilimitada à fadiga, avalia-se o trem tipo vigente em relação ao tráfego real e propõe-se um novo modelo de carga móvel de fadiga. São utilizados dados da estação de pesagem em movimento (*weigh-in-motion* – WIM) da rodovia federal BR-381 (Rodovia Fernão Dias). São consideradas estruturas típicas de pontes com múltiplas vigas e seção celular, onde as razões entre as solicitações do tráfego e do modelo de carga móvel (fatores viés) são determinadas para vãos biapoiados e contínuos em termos de momento fletor e força cortante. Verifica-se que o trem tipo atual apresenta considerável variação nos fatores viés e pode não assegurar vida útil ilimitada à fadiga. O modelo proposto, por outro lado, apresenta fatores viés mais uniformes e condiz melhor com abordagem de vida útil ilimitada à fadiga para o tráfego obtido da estação WIM.

Palavras-chave

Pontes rodoviárias; fadiga; carga móvel; pesagem em movimento

Introdução

As pontes rodoviárias, por receberem um carregamento variável proveniente do tráfego de veículos, são suscetíveis ao fenômeno de fadiga. Esse fenômeno pode ser definido como o processo no qual o dano é acumulado em um material por meio de variações de tensão. Esse dano pode resultar na ruptura estrutural da peça, mesmo que a maior tensão aplicada seja inferior ao limite elástico do material.

A carga móvel rodoviária padrão da norma brasileira NBR 7188 (2013), ilustrada na Figura 1, é proveniente da antiga norma alemã que, de acordo com Pfeil (1979), utilizava veículo de projeto correspondente ao tanque do exército, circundado por carga distribuída. O modelo padrão, também denominado trem tipo, deve ser ponderado ainda por coeficientes de impacto e número de faixas da NBR 7188 (2013) e por coeficientes parciais de segurança da NBR 8681 (2003). Para a verificação de fadiga em longarinas de pontes, a NBR 8681 (2003) apresenta o coeficiente $\psi_{1,fad} = 0,5$ para vãos de até 100 metros. Este coeficiente corresponde à combinação frequente de ações, sendo também indicado na NBR 6118 (2014) e na NBR 16694 (2020).

O trem tipo brasileiro, no entanto, não foi proposto considerando a realidade do tráfego no Brasil. Enquanto a norma brasileira apresenta um único modelo de carga de fadiga, os principais códigos internacionais como o da Europa (Eurocode 1, 2003) e o dos Estados Unidos (AASHTO LRFD, 2017), apresentam carga móvel tanto para vida útil limitada quanto para vida útil ilimitada à fadiga.

Este trabalho estuda o modelo de carga móvel utilizado no Brasil para a verificação de fadiga em pontes rodoviárias. Mediante a abordagem de vida útil ilimitada à fadiga, avalia-se o trem tipo vigente em relação ao tráfego real e propõe-se um novo modelo de carga móvel de fadiga. Para a consideração do tráfego real, utilizam-se dados da estação de pesagem em movimento (*weigh-in-motion* – WIM) da rodovia federal BR-381 (Rodovia Fernão Dias). São consideradas estruturas típicas de pontes em múltiplas vigas e seção celular. As razões entre as solicitações do tráfego e da norma brasileira (fatores viés) são determinadas para vãos biapoiados e contínuos em termos de momento fletor e força cortante. Esses fatores viés são determinados também para o modelo proposto.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

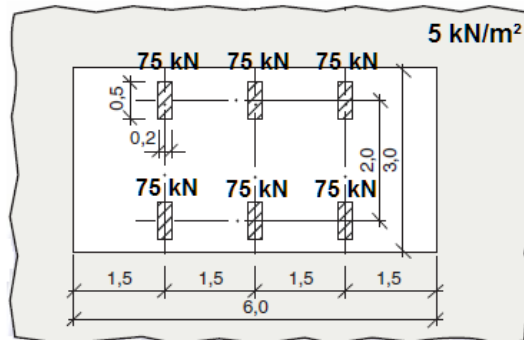


Figura 1 – Carga móvel padrão do Brasil, dimensões em metros (adaptado da NBR 7188, 2013)

Estação de pesagem em movimento (*weigh-in-motion* – WIM)

No que concerne à consideração do tráfego real, este trabalho utiliza registros de veículos obtidos de estação de pesagem em movimento de alta velocidade (*high speed weigh-in-motion* - HS-WIM), conforme se ilustra na Figura 2. O sistema é instalado nas faixas rodoviárias, e os veículos são registrados em tráfego livre, ou seja, não precisam parar ou trafegar em baixa velocidade. Em geral, o sistema é composto por linhas de sensores piezoelétricos, laços indutivos (loops), sensor de temperatura e um dispositivo para coletar e analisar os registros. Os laços indutivos detectam os veículos, medem a distância entre os eixos e a velocidade, enquanto os sensores piezoelétricos são responsáveis pelo peso.

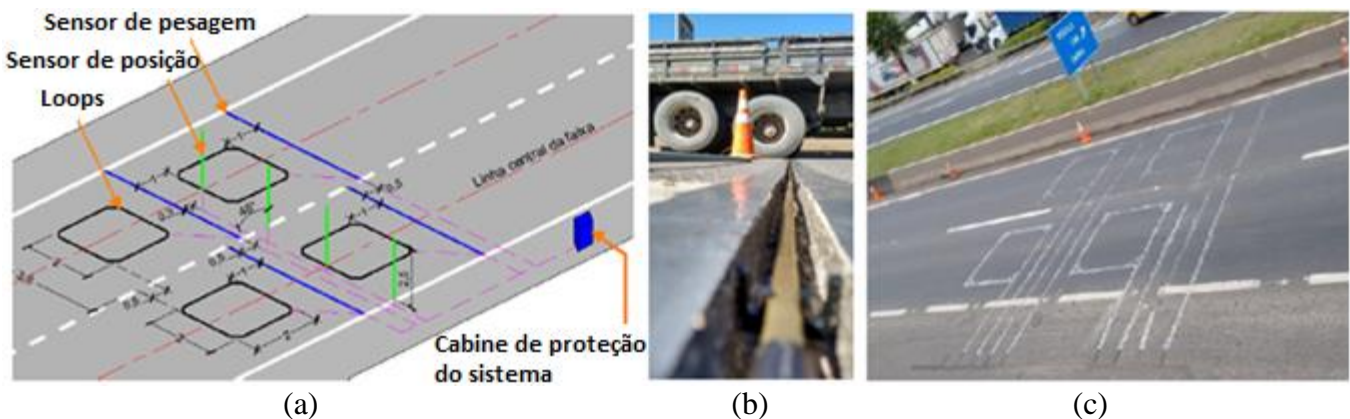


Figura 2 – (a) Layout do sistema HS-WIM na BR-381 (MG-SP), (b) detalhe do sensor de pesagem antes do preenchimento e (c) disposição final na rodovia (os sensores de posição não foram instalados)

Neste trabalho, são utilizados os dados da estação da BR-381 (Fernão Dias, SP-MG), conforme se ilustra na Figura 2. O sistema foi instalado em julho de 2015, em duas faixas rodoviárias de mesmo sentido (Minas Gerais para São Paulo), e a estação permaneceu em operação até 2019. Os dados obtidos eram enviados ao Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - LEM/USP.

Para cada veículo que passa sobre os sensores o sistema fornece informações, como dia, hora, faixa, velocidade, comprimento total, peso total, distância entre eixos e peso de cada eixo. Neste trabalho, os registros são analisados por meio de planilhas do *Microsoft Excel*.

Vale notar que o sistema HS-WIM evita evasão, uma vez que não é percebido pelos motoristas. Além disso, devido ao processo contínuo de obtenção dos dados (24 horas por dia, em dias seguidos), o sistema permite o

conhecimento da real frequência de ocorrência dos veículos, o que é fundamental para a análise de fadiga. Essas particularidades garantem à tecnologia grande vantagem em relação aos postos estáticos de pesagem. A pesagem estática, entretanto, é mais precisa. Como os sensores WIM são fortemente influenciados pela variação de temperatura, o sistema precisa passar por calibrações periódicas. Nessas aferições, um veículo teste de peso conhecido passa no sistema com velocidades variadas em diferentes horas do dia. Entre julho de 2015 a agosto de 2017, a estação da Fernão Dias foi calibrada em julho de 2015, outubro de 2015, fevereiro de 2016, fevereiro de 2017 e maio de 2017. De acordo com Portela (2018), o erro do sistema da BR-381, em relação ao peso total dos caminhões, está em torno de 10%.

Filtragem dos dados WIM

Mesmo com as calibrações, o sistema pode apresentar dados que aparentemente são incorretos. Pesos maiores que a capacidade máxima de tração ou menores que a tara são alguns exemplos. Além disso, diversos dados são desnecessários para o estudo da carga móvel em pontes. Veículos de passageiros e caminhões leves, por exemplo, podem ser desprezados, na maioria das análises, tendo em vista as solicitações irrelevantes que provocam. Desse modo, os dados WIM precisam ser filtrados antes da sua utilização para estudo da carga de projeto. Os critérios de filtragem precisam ser definidos considerando as características particulares da frota de veículos do país e podem variar também de acordo com a necessidade da análise, isto é, Estado Limite Último, serviço ou fadiga.

A listagem seguinte apresenta, em ordem, os filtros que são aplicados à estação considerada. Os filtros foram selecionados mediante a consulta às resoluções do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e catálogos de fabricantes. Veículos que se enquadram em qualquer um dos filtros foram excluídos.

- 1- $PBT \leq 62 \text{ kN}$, onde “PBT” é o peso bruto total do veículo;
- 2- $P_i \leq 22 \text{ kN}$, onde “ P_i ” é o peso por eixo;
- 3- $P_d > 320 \text{ kN}$, onde “ P_d ” é o peso referente ao tandem duplo;
- 4- $d_i \leq 0,92 \text{ m}$, onde “ d_i ” é a distância entre eixos;
- 5- $C > 36 \text{ m}$, onde “ C ” é o comprimento total do veículo;
- 6- $C > 15,4 \text{ m}$ e $PBT \leq 104,3 \text{ kN}$;
- 7- $P_i > 180 \text{ kN}$;
- 8- $PBT \geq 1,1 \cdot \sum P_i$ ou $PBT \leq 0,9 \cdot \sum P_i$, onde “ $\sum P_i$ ” representa a soma dos pesos dos eixos;
- 9- $\sum d_i > C$, onde “ $\sum d_i$ ” representa a soma das distâncias entre eixos;
- 10- $C < 5 \text{ m}$;
- 11- $V > 170 \text{ Km/h}$, onde “ V ” é a velocidade do veículo;
- 12- $P_1 > 100 \text{ kN}$, onde “ P_1 ” é o peso do primeiro eixo (dianteiro);
- 13- $PBT > 1500 \text{ kN}$.

Os filtros 1 e 2 eliminam caminhões leves e carros de passeio, sendo aqueles que mais eliminam dados. Os demais filtros eliminam possíveis erros relativos a dados incoerentes, em que alguns estão relacionados com os limites dos fabricantes.

A quantidade média de veículos diários registrados é de 13.292 antes e 3.632 depois da filtragem (73% dos registros são eliminados). O primeiro e o segundo filtro descartam 68% e 3,5% dos dados, respectivamente, enquanto os outros filtros eliminam, juntos, 1,5% dos registros apenas. Mais informações sobre os dados WIM e as estatísticas de tráfego podem ser verificados em Carneiro (2021), Carneiro, Portela e Bittencourt (2020) e Portela (2018).

Pontes analisadas e métodos para determinação das solicitações

Este trabalho considera estruturas típicas de pontes de concreto com múltiplas vigas e seção celular, conforme se ilustra na Figura 3, que são os tipos mais comuns considerados nos projetos atuais.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

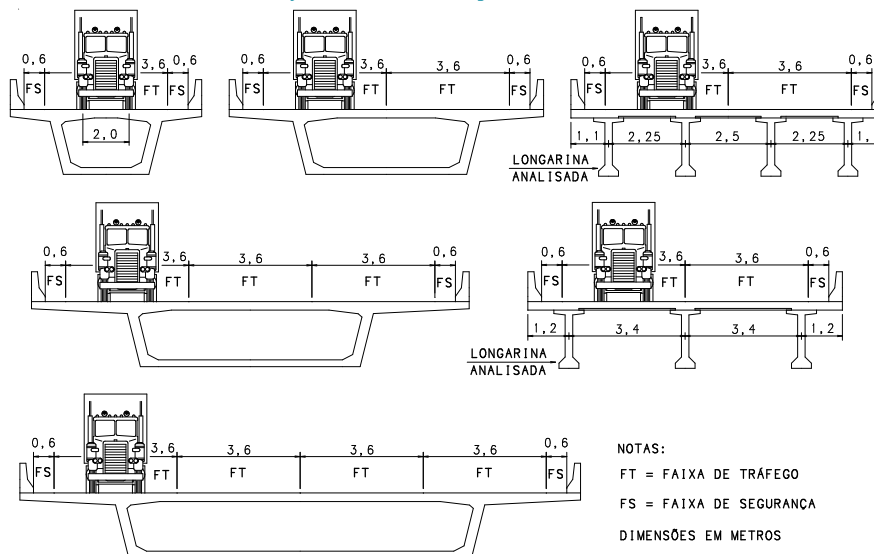


Figura 3 – Seções transversais das pontes

As estruturas com múltiplas vigas foram obtidas de projetos reais e possuem tabuleiros com duas faixas de tráfego (3,60 metros cada), duas faixas de segurança (0,6 metros cada) e dois guarda rodas (0,4 metros cada). Consideram-se seis pontes com longarinas protendidas biapoiadas sem transversinas intermediárias (apenas nos apoios), com vãos de 14, 16, 18, 28, 37 e 41 metros. O vão de 37 metros possui quatro longarinas e os demais possuem três, conforme se apresenta na Figura 3. As pontes com vãos de 18, 28 e 41 metros também foram consideradas como se tivessem transversinas intermediárias.

Em relação às pontes celulares, consideram-se tabuleiros com uma, duas, três ou quatro faixas de tráfego de 3,60 m, onde se utilizam ainda duas faixas de segurança de 0,6 m cada uma, conforme se ilustra na Figura 3. Para cada seção celular, são considerados vãos de 10, 30, 50 e 70 metros em estruturas biapoiadas e contínuas de dois vãos.

Para a determinação das solicitações globais longitudinais em pontes celulares, admite-se que a estrutura seja uma viga única, distribuindo homogeneamente os esforços provenientes das cargas sobre o tabuleiro. Nesse aspecto, devido à grande rigidez à torção da seção fechada, não se faz necessária a avaliação da distribuição transversal dos esforços.

Nas pontes com múltiplas vigas, por outro lado, é necessário o estudo da distribuição dos esforços nas vigas longarinas. Este trabalho utiliza os métodos de Engesser-Courbon e Fauchart para as estruturas com e sem transversinas intermediárias, respectivamente, conforme apresentado em Stucchi (2006). Para ambos os métodos, foram desenvolvidas rotinas no *Microsoft Excel* e para o método de Fauchart utiliza-se também o programa de análise estruturas *Ftool* (2018).

No que diz respeito à análise longitudinal para as pontes biapoiadas, que podem ser com múltiplas vigas ou celular, avaliam-se o momento fletor no meio do vão e a força cortante adjacente ao apoio. Nas pontes celulares contínuas de dois vãos, avalia-se o momento fletor no apoio central. As linhas de influência foram implementadas no *Microsoft Excel*.

Determinação das solicitações do tráfego correspondentes à vida útil ilimitada à fadiga

Para a determinação das solicitações do tráfego correspondentes à vida útil ilimitada à fadiga, este trabalho considera, do mesmo modo que Wassef *et al.* (2014), a passagem individual dos veículos nas estruturas. De acordo com Wassef *et al.* (2014), a análise de fadiga requer a frequência de repetição das ações, isto é, o espectro de carga. Assim, em razão da pequena probabilidade de ocorrência, os autores não consideram as situações de múltiplas presenças.

É importante acrescentar que este trabalho não considera o efeito dinâmico dos veículos, isto é, trata-se de uma análise estática com intuito de avaliar o modelo da norma brasileira sem impacto. A amplificação dinâmica deve ser estudada à parte.

Para a distribuição dos esforços nas vigas longarinas das pontes com múltiplas vigas, considera-se que o veículo está centralizado na faixa de tráfego e se adota a distância transversal de 2 metros entre rodas, conforme se ilustra na Figura 3. As vigas extremas (próximas aos balanços de tabuleiro) resultam nas maiores solicitações tanto do trem tipo quanto dos veículos. Assim, as solicitações analisadas nas pontes com múltiplas vigas são referentes às vigas de extremidade.

As rotinas para o cálculo das solicitações longitudinais dos veículos do WIM, de acordo com as linhas de influência, foram implementadas nas planilhas *Microsoft Excel* que contêm os registros. As rotinas foram validadas com o programa *Ftool* (2018) mediante a comparação das solicitações de diversos veículos. Nas rotinas desenvolvidas, é possível incluir um valor para o fator de distribuição transversal das cargas, que vale 1,0 para pontes celulares. Para pontes com múltiplas vigas, esse fator, que é calculado com os métodos de Engesser-Courbon e Fauchart, variou entre 0,42 e 0,59 para as vigas de extremidade.

Do mesmo modo que Wassef *et al.* (2014), este trabalho utiliza o método gráfico do papel de probabilidade normal para a interpretação estatística dos dados. Nesse método, o eixo horizontal representa a variável em análise e o eixo vertical representa o número de desvios padrão em relação ao valor médio, que também é referenciado como “variável normal padrão” ou “eixo z”. O eixo vertical também pode ser interpretado como a probabilidade de ser excedido. Sendo “X” a variável aleatória e “Q” a quantidade de pontos da amostra, o procedimento de construção gráfica, de acordo com Nowak e Collins (2013), segue as seguintes etapas:

- 1- Organizam-se os valores dos dados da variável X em ordem crescente atribuindo a cada valor um índice “i” que varia de 1 a Q. Não se descartam valores repetidos;
- 2- para cada valor “ x_i ”, associa-se a probabilidade acumulada “ $p_i = i/(Q+1)$ ”;
- 3- para cada valor “ p_i ”, determina-se $z_i = \Phi^{-1}(p_i)$, que representa a inversa da distribuição normal padrão;
- 4- plotar as coordenadas (x_i, z_i).

Esse procedimento é realizado para cada ponte. A variável aleatória X corresponde à solicitação (momento fletor ou força cortante) de cada veículo do sistema WIM e “Q” representa a quantidade de veículos, após a filtragem.

Para a calibração da carga móvel de projeto da AASHTO LRFD (2017) para vida útil ilimitada à fadiga, Wassef *et al.* (2014) obtêm momentos fletores referentes à probabilidade de 0,01% de ser excedidos. Isso equivale ao percentual de 99,99%, que corresponde à cota vertical $z = 3,8$ no papel de probabilidade. Esses momentos têm correspondência com a máxima variação de tensão para a vida útil ilimitada.

Na Figura 4, apresenta-se a determinação do momento no meio do vão para o vão biapoiado de 10 metros da ponte celular. A curva ilustrada na Figura 4 é constituída de vários pontos e cada ponto representa um veículo da base de dados após a filtragem.

Para a determinação das solicitações, este trabalho utiliza os registros da estação Fernão Dias de setembro de 2016 a maio de 2017 (273 dias). Verificou-se que, desde que se utilize no mínimo quatro meses da estação, os resultados praticamente não se alteram com o aumento da quantidade de meses.

Avaliação do trem tipo brasileiro em relação ao tráfego real

Para a avaliação do trem tipo brasileiro, determinam-se os fatores viés, isto é, as razões entre as solicitações do tráfego e da norma. Considera-se o modelo padrão da norma brasileira de acordo com os valores dos carregamentos apresentados na Figura 1. Não se considera impacto nem coeficientes de ponderação. Assim, o coeficiente de fadiga $\psi_{1,fad} = 0,5$ é avaliado de acordo com os fatores viés obtidos. Fatores menores que 0,5 indicam que o modelo brasileiro é compatível com a abordagem de vida útil ilimitada à fadiga em relação ao tráfego real, enquanto fatores maiores que esse valor indicam o contrário.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

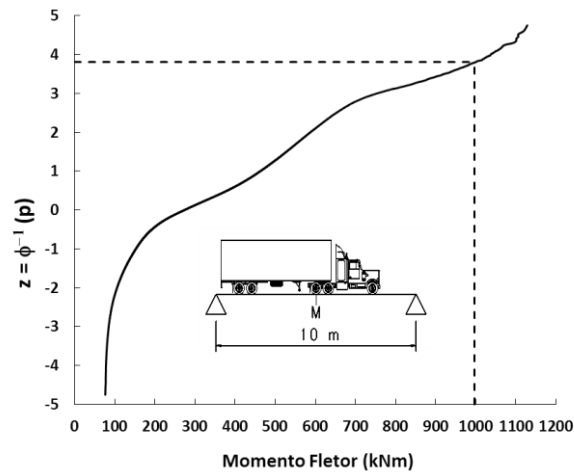


Figura 4 – Exemplo de determinação da solicitação do tráfego no papel de probabilidade normal

São apresentados os fatores viés para o momento fletor no meio do vão de pontes biapoiadas, o momento fletor no apoio de pontes contínuas de dois vãos e a força cortante adjacente ao apoio de pontes biapoiadas. Do mesmo modo que todos os esforços dos veículos do WIM, as solicitações de norma, para pontes biapoiadas, foram calculadas de acordo com as rotinas desenvolvidas no *Microsoft Excel*. As solicitações de norma para as pontes contínuas foram obtidas do programa *Ftool* (2018).

Nas Figuras 5 a 7, apresentam-se os fatores viés referente a seção celular. Verifica-se que os fatores viés não apresentam uniformidade, isto é, o modelo vigente pode corresponder com a abordagem de vida útil ilimitada à fadiga ou não, dependendo do comprimento do vão e da largura do tabuleiro da ponte. Em geral, o TB450 tem característica de modelo para a vida útil ilimitada à fadiga em relação ao tráfego real no caso de pontes com maiores vãos e tabuleiros de múltiplas faixas. Para pontes de menores vãos, especialmente no caso de tabuleiros com uma e duas faixas, o trem-tipo brasileiro não é compatível a perspectiva de vida útil ilimitada à fadiga. Assim, é importante que se desenvolva um modelo brasileiro de carga móvel para a vida útil ilimitada à fadiga que proporcione fatores de viés mais uniformes.

Na Figura 8, apresenta-se os fatores viés para pontes com múltiplas vigas com duas faixas de tráfego e vãos biapoiados de até 40 metros, que são as estruturas mais frequentes nas rodovias brasileiras. Nesse caso, nota-se que os fatores viés variam próximo de 0,8. Assim, para estas estruturas, o coeficiente igual a 0,8 para o TB450 condiz melhor com a abordagem de vida útil ilimitada à fadiga.

O fato de o modelo da NBR 7188 (2013) ser conservador para pontes com maiores extensões e tabuleiros mais largos deve-se principalmente à carga distribuída considerada ao longo de toda a largura do tabuleiro e extensão longitudinal da ponte de forma mais desfavorável.

É válido notar que, se fosse considerado o coeficiente do número de faixas (CNF) da NBR 7188 (2013), os fatores viés sofreriam pequenas alterações entre 5% e 10%, aproximadamente. O coeficiente vale 1,05 para uma faixa, 1,0 para duas, 0,95 para três e 0,90 para quatro faixas.

Proposição do modelo brasileiro para a vida útil ilimitada à fadiga

Na determinação das solicitações correspondentes à vida útil ilimitada, verifica-se que o caminhão de seis eixos 3S3, com peso maior que a lei da balança, é responsável pela maioria das solicitações próximas ao percentual de 99,99%. Assim, após a avaliação dos veículos de seis eixos associados ao percentual considerado, propõe-se o modelo da Figura 9 referente à carga móvel para vida útil ilimitada à fadiga no Brasil.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

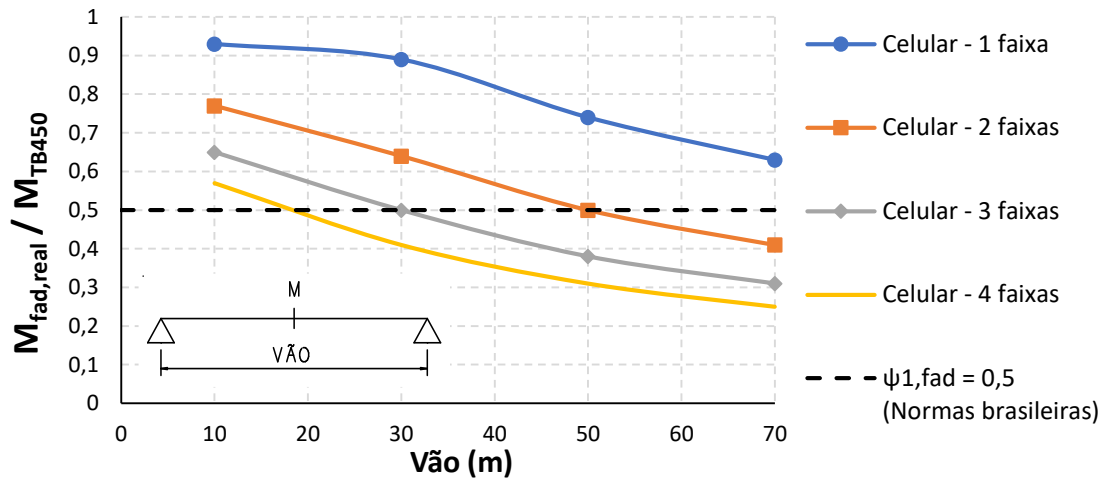


Figura 5 – Fatores viés para o momento no meio de vão de pontes celulares biapoiadas

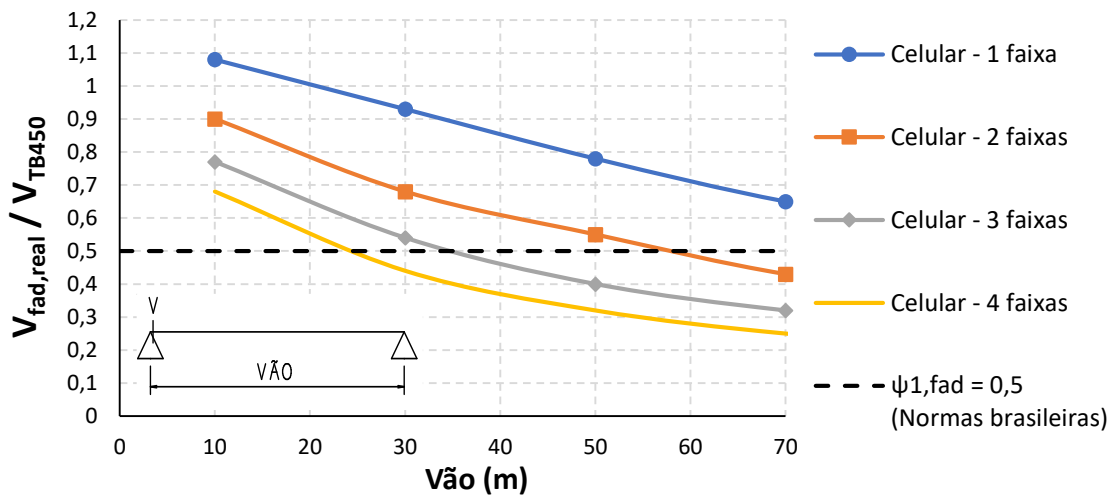


Figura 6 – Fatores viés para a força cortante no apoio de pontes celulares biapoiadas

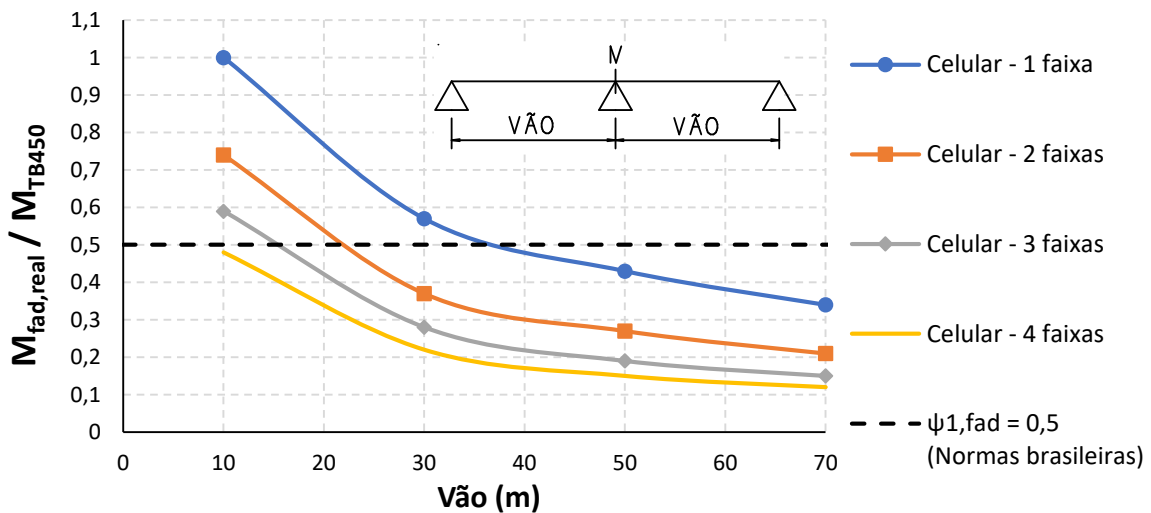


Figura 7 – Fatores viés para o momento no apoio de pontes celulares contínuas

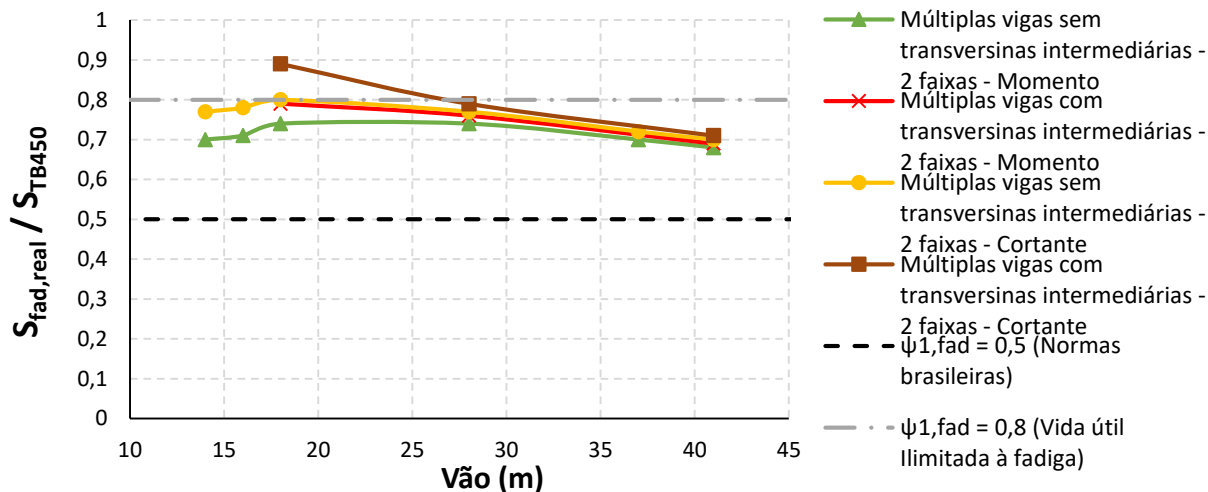


Figura 8 – Fatores viés (referentes a momento fletor no meio do vão e força cortante adjacente ao apoio) para pontes com múltiplas vigas

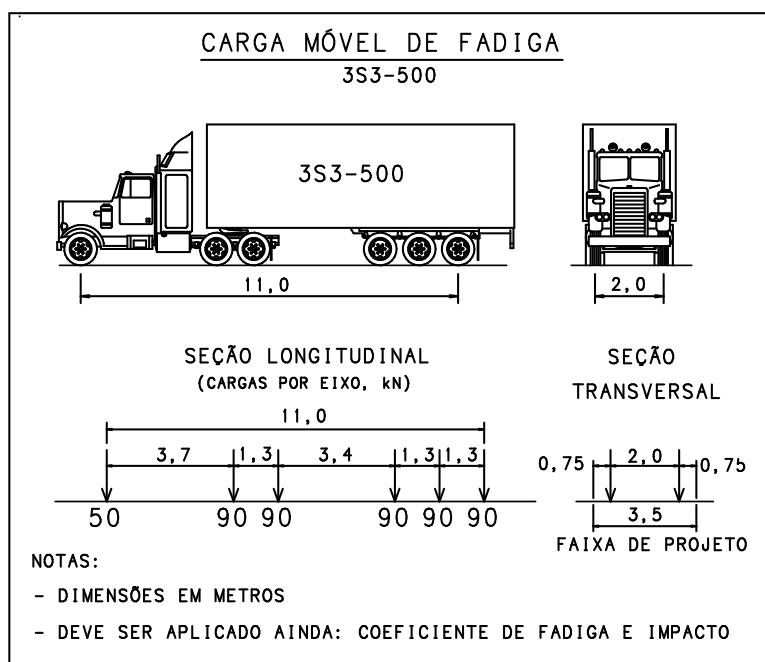


Figura 9 – Modelo brasileiro proposto para a vida útil ilimitada à fadiga

Apesar de os caminhões associados ao percentual de 99,99 % ultrapassarem o peso legal, foi utilizado o peso de 500 kN para o veículo de projeto, que está de acordo com o valor da lei da balança (509,25 kN, com tolerância de 5%). Após a avaliação do modelo proposto em relação ao tráfego real, propõe-se um coeficiente de ponderação para as cargas de acordo com os fatores viés obtidos.

O modelo proposto considera o veículo de projeto centralizado em uma faixa de projeto de 3,5 m de largura. Essa faixa independe das faixas rodoviárias e assume posição qualquer em toda a pista rodoviária, de modo mais desfavorável, considerando inclusive acostamentos e faixas de segurança.

Na Figura 10, apresentam-se os fatores viés para o modelo proposto. Todas as solicitações foram calculadas de acordo com as rotinas desenvolvidas no *Microsoft Excel*. Verifica-se que os fatores viés são mais uniformes e o valor médio é próximo de 1,7. Assim, este trabalho propõe um coeficiente de fadiga $\gamma_{fad} = 1,7$ a ser aplicado às cargas do veículo de projeto.

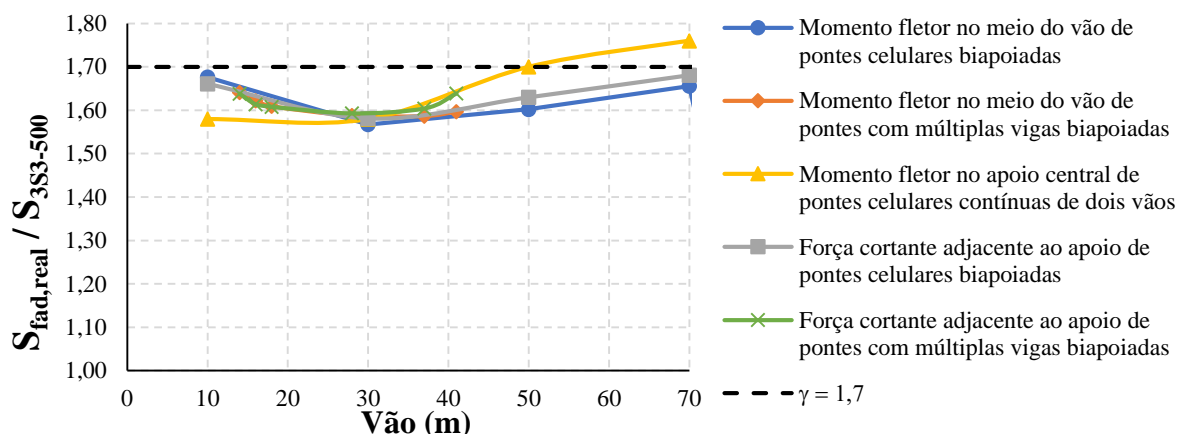


Figura 10 – Fatores viés para o modelo proposto

É importante ressaltar que o modelo foi desenvolvido mediante a análise de solicitações longitudinais globais. Desse modo, sua utilização em lajes e transversinas, por exemplo, requer estudos adicionais. Além disso, o modelo é destinado somente a projetos de novas pontes que considerem vida útil ilimitada à fadiga.

Coefficiente de impacto para o modelo proposto

Para obtenção do coeficiente de impacto do modelo proposto, este trabalho utiliza o fator de amplificação dinâmica apresentado em Almeida *et al.* (2010). Utilizando carretas de cinco e seis eixos com peso total de 450 kN, os autores realizaram monitoração dinâmica em pontes brasileiras com vãos entre 7,5 m e 45 m e verificaram que os fatores de amplificação dinâmica tiveram melhor correlação com três variáveis: comprimento do vão da ponte, velocidade do veículo e frequência natural da ponte. A equação (1) apresenta o fator de amplificação dinâmica (FAD) obtido.

$$FAD = 1,099 + 1,439.S \quad (1)$$

onde

S: parâmetro de velocidade adimensional; $S = \pi.v/(L.\omega)$

v: velocidade do veículo, em m/s;

L: comprimento do vão, em metros;

ω : frequência angular natural da ponte, em rad/s; $\omega = 2.\pi.95,4/L^{0,933}$.

Para as pontes com múltiplas vigas (vãos entre 14 e 41 metros), o FAD foi aplicado aos veículos do WIM e as solicitações, com amplificação dinâmica, correspondentes à vida útil ilimitada à fadiga (percentual de 99,99%) foram obtidas. Para os vãos considerados, o valor médio da razão entre as solicitações para vida útil ilimitada à fadiga com e sem amplificação dinâmica foi de 1,23 (variação entre 1,22 e 1,24). Assim, este trabalho propõe a aplicação do coeficiente de impacto igual a 1,25 ao modelo da Figura 9. Este coeficiente, no entanto, pode ser reavaliado mediante futuros estudos de análise dinâmica.

Considerações finais e conclusões

Este trabalho avaliou o trem tipo vigente para verificação de fadiga em pontes rodoviárias em relação ao tráfego real e propôs um novo modelo de carga móvel de fadiga. Foram considerados dados da estação de pesagem em movimento (*weigh-in-motion* – WIM) da rodovia federal BR-381 (Rodovia Fernão Dias). Considerando a abordagem de vida útil ilimitada à fadiga em estruturas típicas de pontes com múltiplas vigas e seção celular, determinaram-se as razões entre as solicitações longitudinais do tráfego e da carga móvel (fatores viés) levando em conta a norma brasileira e o novo modelo. O veículo de projeto foi proposto com



base nos veículos do tráfego correspondentes às solicitações de vida útil ilimitada à fadiga. Com base no estudo realizado, é possível apresentar os seguintes apontamentos principais:

- O modelo vigente da norma brasileira não apresenta fatores de viés uniformes. Em geral, o modelo vigente é compatível com a abordagem de vida útil ilimitada à fadiga no caso de pontes com maiores vãos e tabuleiros com múltiplas faixas. Para pontes de menores vãos, especialmente no caso de tabuleiros com uma ou duas faixas, o trem-tipo não tem característica de modelo para a vida útil ilimitada à fadiga.
- No caso particular de pontes com múltiplas vigas, com duas faixas de tráfego e vãos biapoiados de até 40 metros, que são as estruturas mais frequentes nas rodovias brasileiras, o coeficiente igual a 0,8 para o TB450 condiz melhor com a abordagem de vida útil ilimitada à fadiga.
- O modelo proposto, que por sua vez possui veículo de projeto similar aos veículos das rodovias brasileiras, apresenta fatores de viés mais uniformes e corresponde melhor com o propósito de vida útil ilimitada à fadiga.

É importante ressaltar que este estudo pode ser reavaliado mediante a análise de dados de outras rodovias. Além disso, os apontamentos não concluem sobre a segurança à fadiga do modelo brasileiro, e sim sobre a correspondência dele em relação à vida útil ilimitada à fadiga. A avaliação do nível de segurança do modelo vigente, assim como a utilização do modelo proposto, requer estudos de vida útil e confiabilidade à fadiga em pontes de aço e concreto.

Referências

- ALMEIDA, P. A. O; RODRIGUES, J. F. S; LIMA, A. B. Critérios de otimização de projetos de pontes a partir de espectros de aceleração induzidas por veículos nos tabuleiros, LSE, 2010.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ações e segurança nas estruturas. – Procedimento. - NBR 8681, Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas - NBR 7188, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas de Concreto. – Procedimento. - NBR 6118, Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Pontes Rodoviárias de Aço e Mistas de Aço e Concreto. - NBR 16694, Rio de Janeiro, 2020.
- CARNEIRO, A. L. Avaliação do nível de segurança à fadiga proporcionado pelas normas brasileiras de projeto em relação às longarinas de pontes rodoviárias de concreto. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.
- CARNEIRO, A. L.; PORTELA, E. L.; BITTENCOURT, T. N. Development of Brazilian highway live load model for unlimited fatigue life, Rev. IBRACON Estrut. Mater., vol. 13, no. 4, e13407, 2020.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges, 2003.
- FTOOL – Two-dimensional Frame Analysis Tool: versão 4.00 (básica). Luiz Fernando Martha, 2018. Disponível em <http://www.ftool.com.br>
- NOWAK, A.; COLLINS, K. Reliability of Structures. McGraw-Hill, New York, 2013.
- PFEIL, W. Pontes em Concreto Armado. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1979.
- PORTELA, E. L. Analysis and development of a live load model for Brazilian concrete bridges based on WIM data. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- STUCCHI, F. R.; Pontes e grandes estruturas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- WASSEF, W. G.; NASSIF, H.; MERTZ, D.; NOWAK, A. S. Calibration of AASHTO LRFD Concrete Bridge Design Specifications for Serviceability. NCHRP Project 12-83, 2014.