



Análise Estrutural Dinâmica Não Determinística do Vão Central Metálico da Ponte Honestino Guimarães (Brasília/DF)

Thyago Hannan dos Santos Ramos¹, Guilherme Santana Alencar², José Guilherme Santos da Silva³

¹ UERJ / Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil / th.hannan.19@gmail.com

² UnB / Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / guilherme.alencar@unb.br

³ UERJ / Departamento de Estruturas e Fundações / jgss@uerj.br

Resumo

A ponte Honestino Guimarães foi inaugurada em meados da década de 1970, sendo a única estrutura do tipo projetada pelo renomado arquiteto Oscar Niemeyer na cidade de Brasília, Distrito Federal do Brasil, utilizando seu conhecimento do sistema estrutural para criar um ambiente simbólico e harmonioso, possuindo em seu centro uma estrutura mista de concreto e aço. O vão central metálico em tabuleiro ortotrópico apresenta uma forma arqueada, encaixe em Gerber e simetria longitudinal. Desse modo, esta pesquisa tem por objetivo, investigar o comportamento estrutural dinâmico não determinístico, extrair tensões *hot-spots* do submodelo identificado através do aplicativo Veicule Bridge Interaction (VBI) que integra os programas computacionais, ANSYS e MATLAB, com base na extrapolação linear em submodelos, confeccionados a partir de elementos de casca (SHELL188), afim de posterior estudo à fadiga estrutural no vão central da ponte. Deste modo, foram elaborados um modelo global e um submodelo numérico em elementos finitos, através do programa computacional ANSYS, contendo as principais características físicas e mecânicas do vão central da ponte que possui comprimento de 58 m e largura de 13,50 m, e a espessura da laje de concreto varia de 0,07 m a 0,12 m. O modelo do tabuleiro metálico apoia-se em quatro pontos em cada extremidade, localização onde estão os quatro aparelhos de apoio esféricos. Foi verificado que, a partir do aumento da velocidade do veículo, observou-se uma redução no intervalo de tempo em que as tensões *hot-spots* atingiram seus valores máximos. O intervalo entre as tensões máximas diminui à medida que a velocidade aumenta, indicando cargas dinâmicas mais rápidas e concentradas. A intensidade das tensões *hot-spots* é mais influenciada pelo número de modos de vibração do que pela velocidade, ressaltando a importância de uma modelagem adequada para capturar efeitos dinâmicos.

Palavras-chave

Pontes Rodoviárias; Análise Estrutural Dinâmica; Irregularidades da Pista; Tensões *Hot-Spots*.

1. Introdução

A ponte Honestino Guimarães, inaugurada em meados dos anos 1970, é a única estrutura desse tipo concebida pelo célebre arquiteto Oscar Niemeyer em Brasília, Distrito Federal, Brasil. Niemeyer empregou seu domínio dos sistemas estruturais para desenvolver uma obra que combina simbolismo e harmonia, evidenciando a integração entre forma e função estrutural. A maioria das pontes brasileiras foi projetada e construída antes de 1980 (ALENCAR et al., 2019), o que significa que agora estão chegando ao fim de sua vida útil estimada de 50 anos. Este envelhecimento, combinado com a exposição dos elementos, levou à diminuição da durabilidade e a danos visíveis, levantando preocupações de segurança entre os utilizadores. Além disso, o tráfego urbano atual, incluindo uma maior variedade e número de caminhões mais pesados, difere significativamente das condições de há 50 anos, sobrecarregando ainda mais estas estruturas.

A estrutura da ponte é constituída por dois vão intermediários em concreto armado, e uma estrutura metálica ortotrópica em forma de caixão no vão central (alvo deste estudo), com ligações soldadas sujeitas a danos causados pelo tráfego intenso que aumentou, significativamente, nas últimas décadas devido ao crescimento populacional da cidade. Além disso, entre 2021 e 2024, a ponte passou por reformas que modificaram alguns de seus componentes estruturais: protensão externa dos arcos, reforço com fibra de carbono nas almas da seção caixão em concreto armado e substituição dos dispositivos de suporte no vão central

(BARBOSA, 2022). Alterações no tráfego podem causar preocupações quanto ao desgaste estrutural que a ponte pode sofrer e as implicações na sua vida útil. Pelo vão central se tratar de uma estrutura metálica antiga, o controle de fabricação e o nível de execução de construções da época era outro, indicando a necessidade do monitoramento frente a cargas dinâmicas. Esses fluxos de tensões dinâmicas em pontes tendem a ocorrer sob tráfego intenso, representando um desafio global que pode levar a graves acidentes e tragédias. Acompanhamento experimental, modelagem e inspeções adicionais de manutenção são úteis para previsibilidade de possíveis problemas estruturais, minimizando danos de naturezas específicas (SILVA, 2020).

Em seu estudo sobre a ponte sobre o rio Taizhou Yangtze, ZHUANG et al. (2020), corrobora que os principais critérios que afetam esses fatores são características ambientais graduais que envolvem tensões e deflexões dinâmicas, observadas em tabuleiros de pontes metálicas, intrínsecos aos seus detalhes estruturais. A calibração de modelos computacionais e a escolha de uma estratégia de modelação adequada, associados com informações pertinentes ao tráfego de veículos, aumentam a segurança na estimativa da vida útil de pontes (ALMEIDA, 2006).

O principal modo de manifestação quanto a problemas dinâmicos estruturais em tabuleiros ortotrópicos de aço são trincas sobre as ligações soldadas (LIU et al., 2022), onde aproximadamente 90% são causadas por distorções fora do plano ou outras tensões secundárias inesperadas (STOURA et al., 2021). Essas trincas se acumulam em regiões intermediárias entre o perfil e o filete de solda, em regiões de concentração de tensões. Neste contexto, o modelo estrutural em elementos finitos e a definição do submodelo adequado surgem para verificar com eficiência os comportamentos das cargas dinâmicas no submodelo e tensões geométricas, também chamadas tensões *hot-spots*, que levam em conta a concentração de tensão devido à geometria da solda, que vêm contribuir para a posterior verificação da fadiga estrutural (RAMOS, 2025).

2. Metodologia Numérica de Interação Veículo-Estrutura (VBI) para Matrizes Desacopladas

Neste estudo, adota-se a abordagem desacoplada, na qual as equações de equilíbrio dinâmico da ponte e do veículo são formuladas separadamente. A compatibilização entre os dois sistemas é realizada por meio de um método iterativo, que considera a ponte e o veículo como subsistemas independentes. A cada incremento de tempo, um processo iterativo é aplicado para garantir a compatibilidade das forças dinâmicas de interação e dos deslocamentos sob a ação de cargas móveis, permitindo que ambos os sistemas sejam calculados simultaneamente ao longo do tempo.

Assim sendo, foi empregado a aplicação computacional VBI (Vehicle-Bridge Interaction) com objetivo de extrair tensões *hot-spots* através de extrapolação linear do submodelo da ponte relacionado à interação dinâmica Ponte-Veículo. Essa ferramenta foi desenvolvida por RIBEIRO (2012) com intuito de estudar os efeitos dinâmicos produzidos por cargas de trens sobre pontes ferroviárias, levando em consideração perfis de irregularidades calculados e inseridos como valores de entrada, essa versão foi divulgada como TBI (Train-Bridge Interaction). Então, o VBI surge com adaptações dos códigos presentes no TBI, tendo como objetivo inicial avaliações dinâmicas e interação Ponte-Veículo, considerando irregularidades no pavimento presentes em pontes rodoviárias.

No VBI a ponte, o veículo e o submodelo são modelados, através do programa computacional, ANSYS (2017), sendo o submodelo realizado conforme os dados do modelo global (ponte), ou seja, possui uma dependência de parâmetros. O MATLAB (2018) faz a integração entre os arquivos do ANSYS (2017), extraindo as informações dos modelos, geometria, matrizes de massa, matrizes de rigidez e amortecimento de todos os subsistemas. Com base no método da superposição modal e da integração direta (Newmark), as equações de equilíbrio dinâmico da ponte e do veículo são solucionadas em um processo iterativo. A Figura 1 exibe o fluxograma com as rotinas associadas ao VBI, para a extração de tensões *hot-spots*, a partir das caracterizações numéricas dos modelos: global, veículo e submodelo.

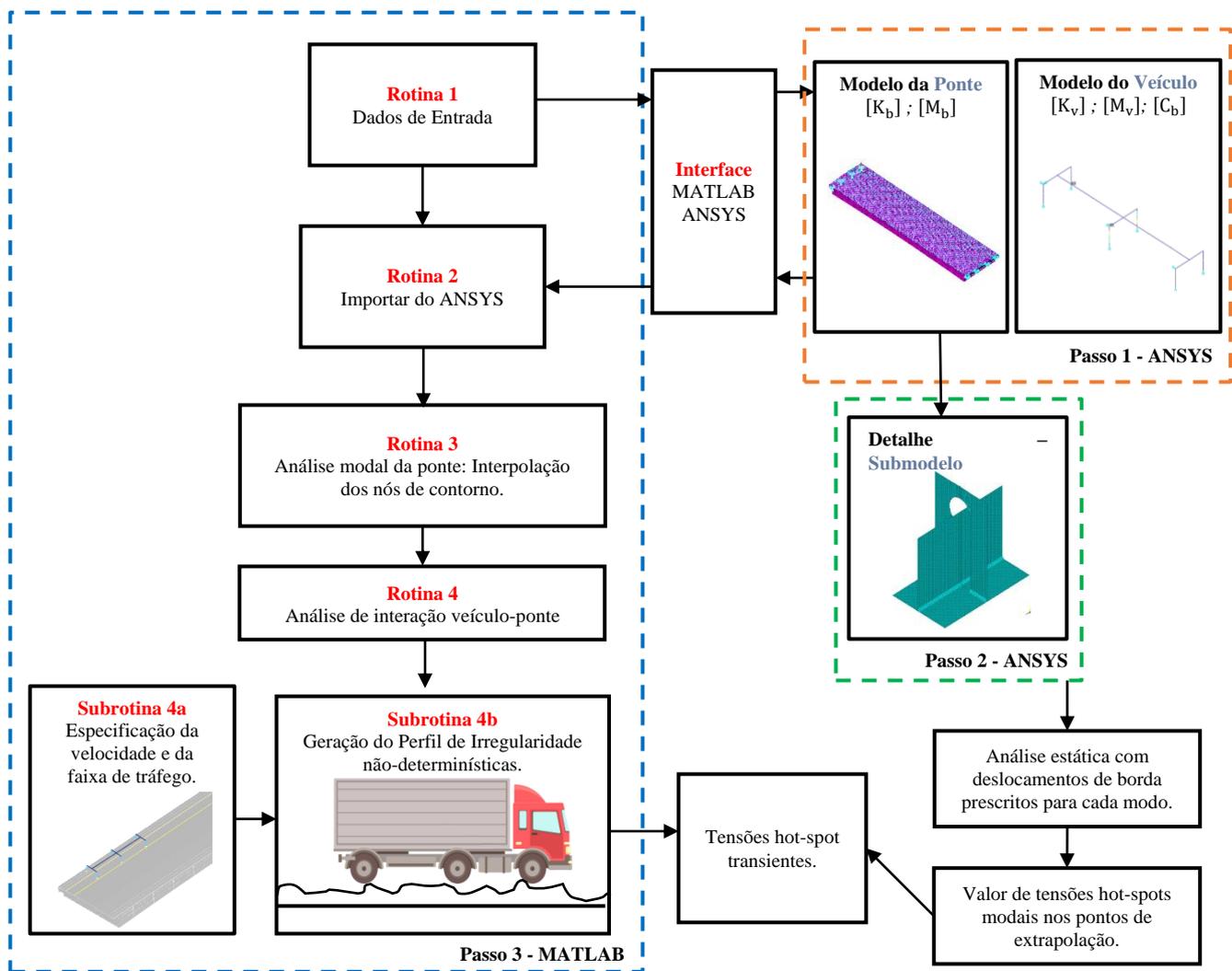


Figura 1 – Fluxograma do programa VBI (Vehicle-Bridge Interaction) (RAMOS, 2025).

1.1. Orientações para a Determinação de Tensões *Hot-Spots* no Submodelo em Elementos Finitos

Durante a fase de projeto, a avaliação com uso do método dos elementos finitos é uma técnica ideal para calcular tensões geométricas em pontos sensíveis da estrutura, isto é, tensões magnificadas pelo efeito da concentração de tensões. Nesse sentido, é importante a construção de um modelo adequado para a análise das tensões geométricas, também chamadas tensões estruturais ou tensões *hot-spots*. O comportamento elástico linear do material pode ser normalmente assumido, uma vez que apenas o escoamento localizado é permitido pela maioria dos códigos de projeto. O resultado da análise de elementos finitos é sensível à malha, pois as tensões *hot-spots* estruturais, frequentemente, estão em área de concentração de tensões (ALENCAR et al., 2021). Para extrapolação linear em submodelos confeccionados a partir de elementos de casca (SHELL188) as tensões nodais *hot-spots* próximas às soldas (σ_{hs}), podem ser determinados através de tensões às distâncias de $0,4 \times t_w$ ($\sigma_{0,4tw}$) e $1,0 \times t_w$ ($\sigma_{1,0tw}$), onde t_w é a espessura do perfil (HOBBACHER, 2009), conforme à Equação (1):

$$\sigma_{hs} = 1,67\sigma_{0,4tw} - 0,67\sigma_{1,0tw} \quad (1)$$

O método da tensão *hot-spot* considera o aumento da tensão causado por descontinuidades geométricas, mas não leva em conta a tensão localizada especificamente no entalhe da solda do elemento estrutural em questão. Tendo como base a tensão máxima próxima à borda do cordão de solda, incluindo os efeitos da concentração de tensão devido à geometria geral da estrutura, enquanto exclui os efeitos não lineares que estão ligados à geometria específica do cordão de solda (HOBBACHER, 2009).

1.2. Irregularidades do Pavimento

As irregularidades no pavimento de pontes rodoviárias podem surgir de diversas formas, provenientes de amplos fatores relacionados ao projeto, à execução e às condições ambientais submetidas. Além destes, cargas excessivas e constantes contribuem para a aceleração da deterioração do pavimento, diminuindo a capacidade de resistência e aumentando a vibração na estrutura (ALENCAR et al., 2018). Para este trabalho, foi considerado o modelo randômico conforme a densidade espectral do pavimento, tendo como base a equação de DODDS & ROBSON (1973) para irregularidades não determinísticas do pavimento. A Equação (2), representa o modelo de discretização para um conjunto de irregularidades de forma aproximada.

$$i(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2 \cdot \Delta\Omega \cdot G_d(\Omega_i)} \cdot \cos(2\pi \cdot \Omega_i \cdot x \cdot \theta_i) \quad (2)$$

Sendo: $\Delta\Omega$ a variação dentro de um intervalo de discretização; $G_d(\Omega_i)$ a densidade espectral dos ciclos de irregularidades (cm^3/ciclo); Ω_i a frequência do harmônico i (ciclo/m); e θ_i o ângulo de fase no harmônico i , no intervalo de 0 à 2π .

A densidade espectral dos ciclos de irregularidades, $G_d(\Omega_i)$, é descrita pela Equação (3):

$$G_d(\Omega_i) = G_d(\Omega_0)_t \left(\frac{\Omega_i}{\Omega_0}\right)^2 \quad (3)$$

Tal que, $G_d(\Omega_0)_t$, é o coeficiente de rugosidade conhecido com RRC (cm^3/ciclo); Ω_0 é a frequência da descontinuidade, igual a $1/2\pi$, e Ω_i representa a frequência espacial do harmônico i (ciclos/m).

Com isso, ZHANG et al. (2013), relaciona o coeficiente de rugosidade, RRC, com o índice de rugosidade, IRI, conforme a Equação (4):

$$\text{RRC}_t = \Phi(\Omega_0)_t = 6,1972 \cdot 10^{-9} \cdot \exp\left(\frac{\text{IRI}_t}{0,42808}\right) + 2 \cdot 10^{-6} \quad (4)$$

2. Modelo Estrutural e Modelo em Elementos Finitos do Vão Central Metálico da Ponte

O modelo investigado consiste em uma estrutura mista de concreto em aço, com o vão central em caixão metálico em aço arqueado e ortotrópico, apresentando o formato do encaixe lateral em dente Gerber, com comprimento de 58,00 m e largura de 13,50 m. Na parte superior tem-se uma laje em concreto com espessura variável entre 7 e 12 cm, aproximadamente. A altura da seção transversal varia entre o início do comprimento e sua medida, 2,29 m e 1,08 m, respectivamente. O caixão metálico está subdividido em três (03) células e a estrutura de passeio e tubulações são dispostas nas extremidades laterais. Para efeitos de posicionamento, foi considerada a orientação do Lago Sul como origem.

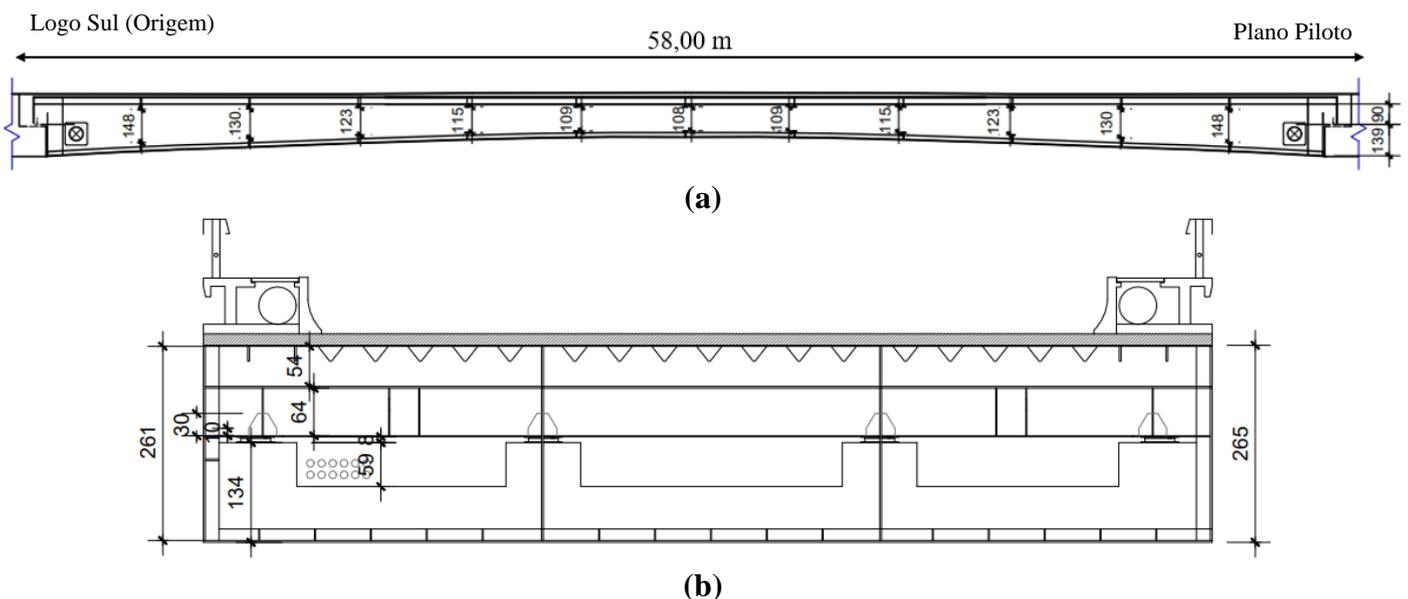


Figura 2 – (a) Vista longitudinal; (b) Seção transversal. Cotas em milímetros (ALMEIDA, 2018).

O tabuleiro metálico central da ponte foi modelado no software ANSYS APDL 17.2, considerando apoio em quatro pontos localizados em cada extremidade, correspondentes às posições dos aparelhos esféricos de apoio. A Figura 4(a) apresenta o modelo numérico em elementos finitos, de modo que este possui 88.136 nós, 86.473 elementos, 236.985 graus de liberdade e uma malha discretizada de aproximadamente 25 cm. A

laje de concreto foi incorporada por meio de conexões rígidas, utilizando elementos 16.281 do tipo MCP184, os quais estabelecem a conexão com a chapa de aço superior do caixão metálico. As chapas do caixão metálico foram modeladas utilizando 55.674 elementos em casca, SHELL181, com formulação linear. Para os enrijecedores longitudinais e transversais, foram utilizados 14.510 elementos em BEAM188 (elemento de viga de Timoshenko compartilhando os mesmos nós dos elementos de casca). O revestimento asfáltico foi representado por elementos de massa (MASS21), distribuídos nos nós que compõem a laje de concreto, estabelecendo a relação com a influência dinâmica da estrutural, possibilitando uma representação aproximada do comportamento estrutural, deste trecho da ponte. A Figura 4(b) exhibe o detalhamento das seções presentes na célula central à 29,00 m da extremidade do vão central (isto é, exatamente no centro), e a região do submodelo. Importante ressaltar que este modelo numérico foi calibrado tanto do ponto de vista estático (prova de carga estática com interrupção do tráfego e passagem de veículos previamente pesados), quanto do ponto de vista dinâmico, via análise modal operacional (ensaios de vibração livre identificação de modos de vibração globais experimentais da estrutura). Isto foi realizado no trabalho de ALMEIDA *et al.* (2025) via algoritmo de otimização.

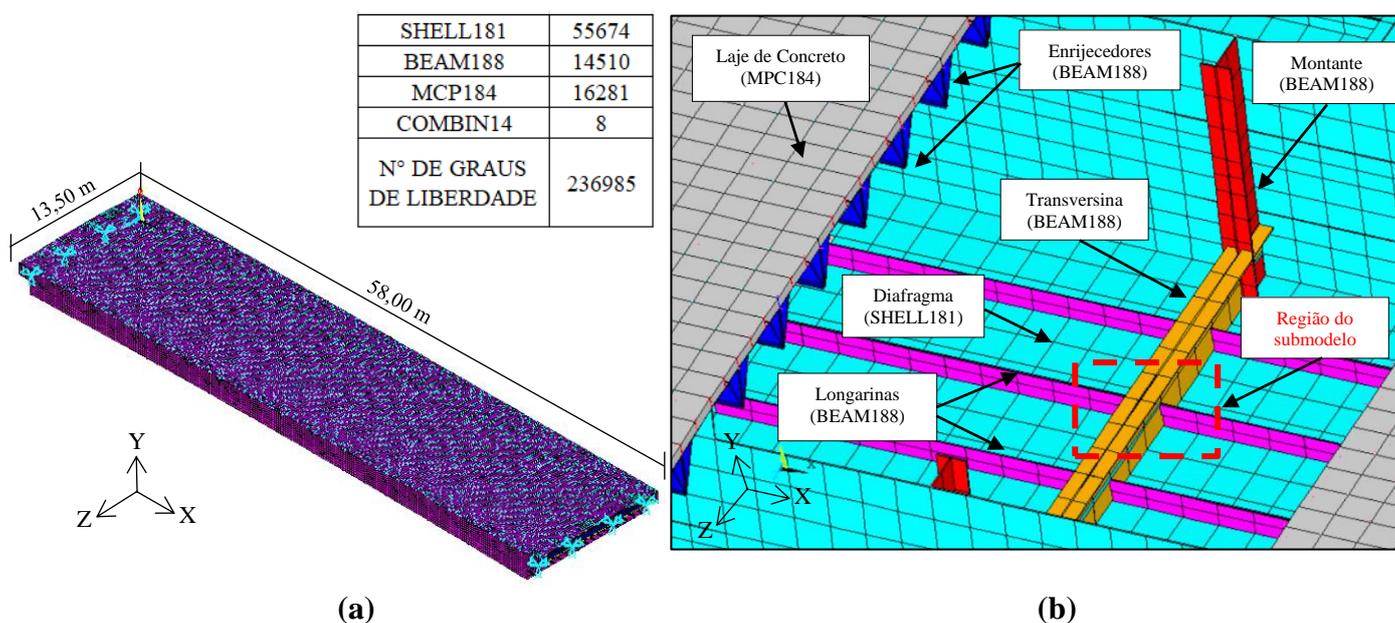


Figura 3 – (a) Modelo em elementos finitos do vão central misto (aço-concreto) da Ponte Honesto Guimarães; (b) Detalhamento do vão central.

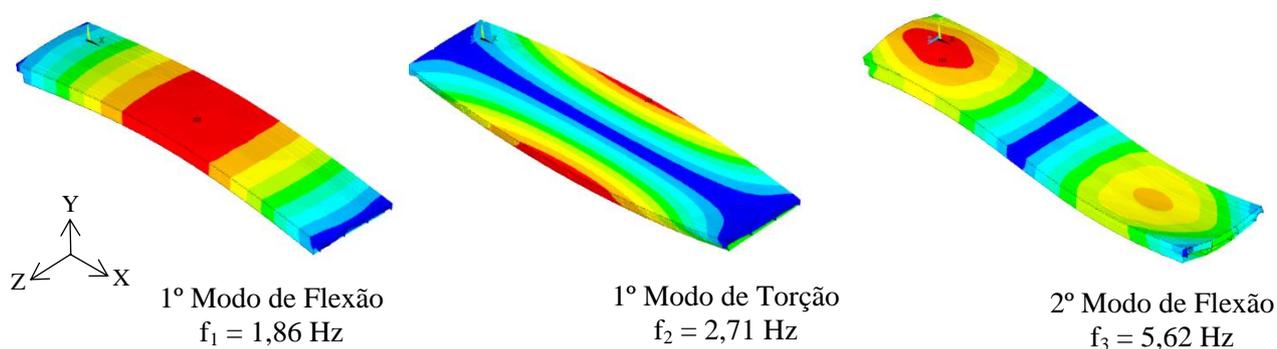


Figura 4 – Modos de vibração do vão central da ponte mista (aço-concreto).

3. Modelo Numérico do Veículo HL-93

O modelo numérico do veículo HL-93 (AASHTO, 2012) foi elaborado através do programa computacional, ANSYS APDL 17.2, apresentando 12 graus de liberdade, e possuindo três (03) eixos, sendo a distância longitudinal entre cada um de 4,30 m e o espaçamento entre os pneus de 1,80 m. Para o 1º eixo (frontal com pneus simples) adotou-se uma carga atuante de 35 kN. Para o 2º eixo (intermediário com pneus duplos) e o 3º eixo (traseiro com pneus duplos), as cargas aplicadas foram iguais a 145 kN (conforme Figura 5). A Tabela 1 indica as propriedades mecânicas do veículo modelado HL-93.

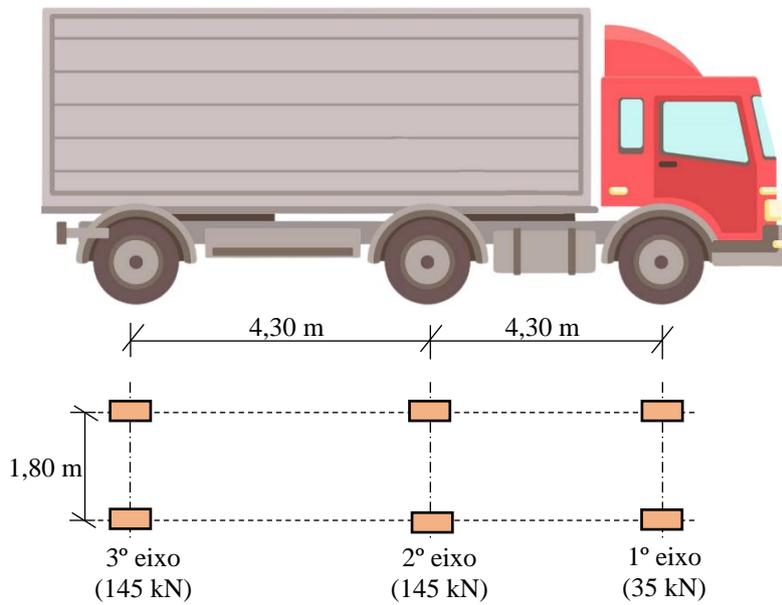


Figura 5 – Modelo do veículo HL-93 (AASHTO, 2012).

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do veículo HL-93.

Propriedades	1° eixo	2° eixo	3° eixo
Massa não suspensa (kg)	490	808	653
Massa suspensa dianteira (kg)		2.612	
Massa suspensa traseira (kg)		28.077	
Amortecimento do eixo (Ns/m)	2.190	7.882	7.182
Amortecimento dos pneus (Ns/m)	2.000	2.000	2.000
Suspensão do eixo (N/m)	242.604	1.903.172	653
Rigidez dos pneus (N/m)	875.082	3.503	3.507.429

A Figura 6 indica os resultados das análises modais para as seis primeiras frequências naturais do veículo HL-93. Onde: $f_{01} = 1,76$ Hz; $f_{02} = 1,92$ Hz; $f_{03} = 2,13$ Hz; $f_{04} = 10,75$ Hz; $f_{05} = 10,77$ Hz e $f_{06} = 18,43$ Hz.

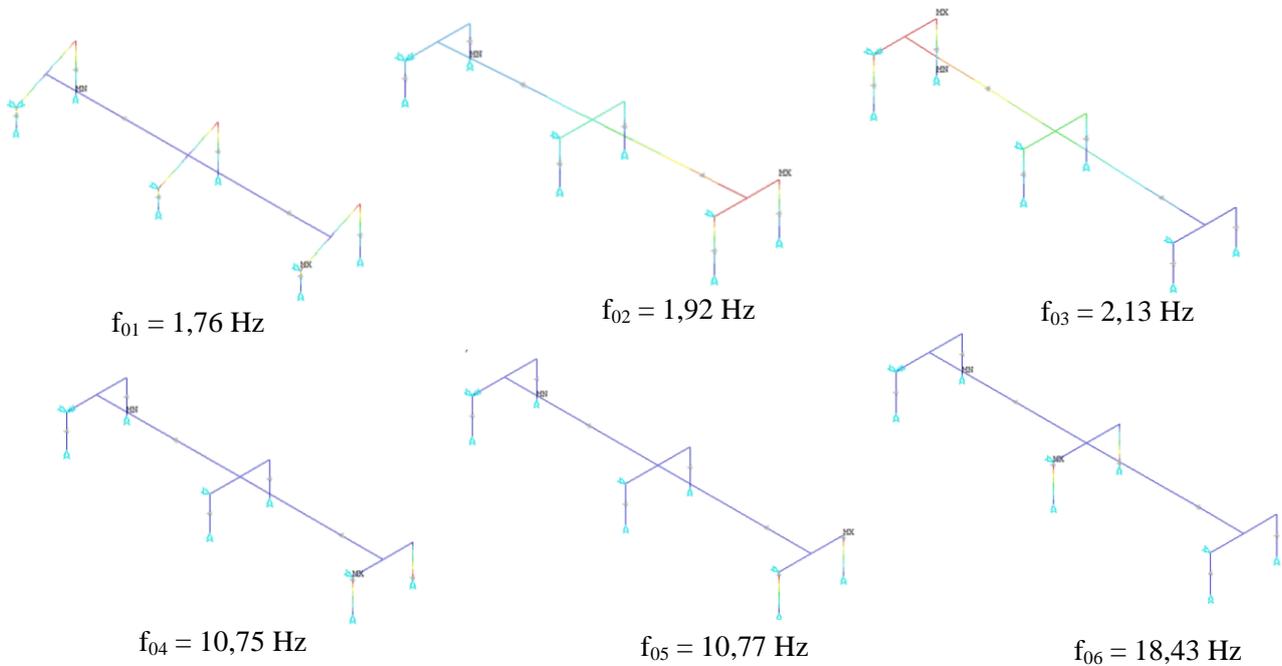


Figura 6 – Modos de vibração do veículo HL-93.

4. Submodelo Desenvolvido para Análise do Detalhe Estrutural Investigado

O submodelo numérico foi elaborado na plataforma ANSYS (2017), conforme o detalhe estrutural para análise à fadiga FAT56 comuns em tabuleiros de caixão ortotrópicos, presente no EN 1993 1-9 (2005), contendo 29.559 elementos de casca (SHELL181), 178.710 graus de liberdade, sem restrições, onde a malha foi discretizada com um tamanho médio 2,00 mm (RAMOS, 2025). Para verificações de tensões no submodelo, os códigos do VBI (Vehicle-Bridge Interaction) importam os deslocamentos nodais prescritos (via análise modal) do modelo numérico global para as fronteiras do submodelo [Figuras 7(a) e 7(b)]. O submodelo numérico apresenta características simétricas do ponto de vista geométrico, com as seguintes dimensões: comprimento de 30,00 cm; largura de 20,00 cm; altura do enrijecedor transversal de 25,00 cm; altura do enrijecedor longitudinal em 17,00 cm; e raio do furo interno e inferior em 3,00 cm [Figura 7(c)].

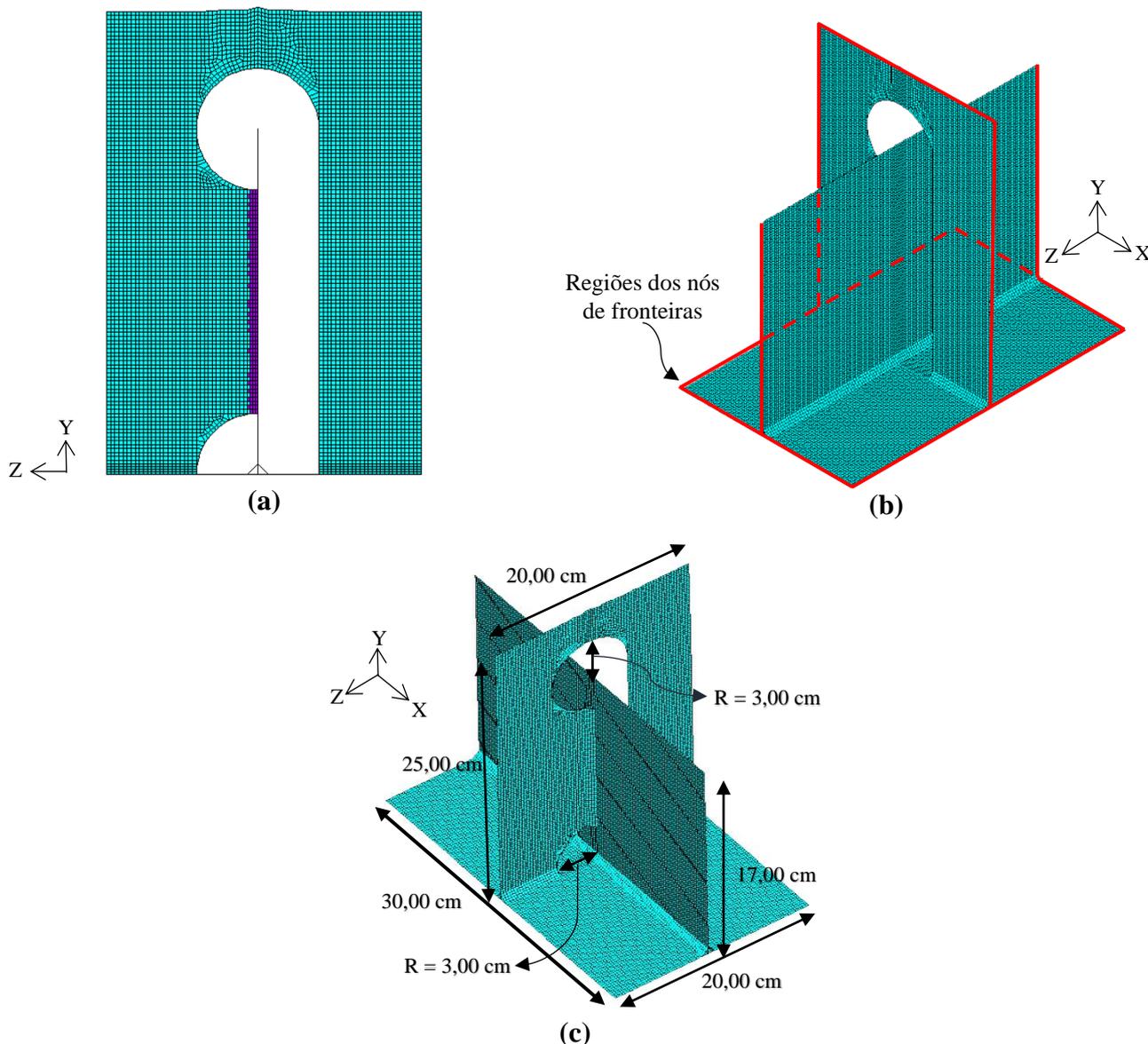


Figura 7 – Submodelo numérico: (a) Vista frontal; (b) Perspectiva cavaleira a 30°; (c) Perspectiva isométrica.

A interpolação linear para deslocamentos nodais (Eixo X) foi feita em dois caminhos. O caminho 1 está mais próximo da solda longitudinal que une o enrijecedor longitudinal à chapa da mesa inferior do caixão, cuja espessura é $t_w = 10$ mm, onde o nó 37321 está a uma distância de $0,4 \times t_w$ e o nó 37318 a $1,0 \times t_w$. O caminho 2 possui os nós 37537 e 37534, e estão distantes de $0,4 \times t_w$ e $1,0 \times t_w$, respectivamente. A Figura 8a, exibe a localização dos caminhos e dos nós onde foram extraídas as tensões *hot-spots* modais do submodelo. A geração do submodelo foi possível a partir do *as-built* do detalhe estrutural soldado no local, realizado quando da colagem de extensômetros para a prova de carga estática [Figura 8(b)]. A comparação dos resultados experimentais dessa prova de carga sobre as deformações medidas com esses extensômetros colados na mesma posição dos nós do submodelo numérico serão tratados na sequência da pesquisa.

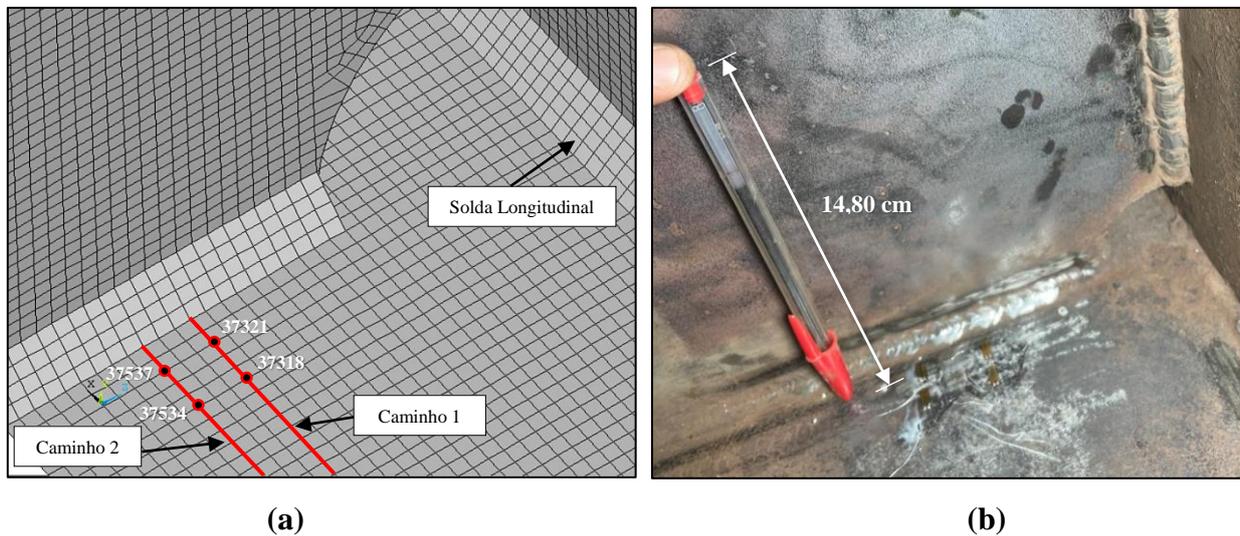


Figura 8 – (a) Submodelo para extração das tensões hot-spot modais; (b) Detalhe estrutural real.

5. Análise e Discussões dos Resultados

Para realização das análises dinâmicas com interação veículo-pavimento-estrutura e extração das tensões *hot-spots* no submodelo conforme o código do VBI (Vehicle-Bridge Interaction) foi adotado um intervalo de integração de 0,001 s. A simulação da velocidade do veículo sobre a faixa central do vão central da ponte ocorreu de forma constante para três diferentes níveis: 40 km/h, 60 km/h e 80 km/h.

As tensões *hot-spots* transientes foram obtidas a partir da multiplicação da Matriz de Coordenadas Modais Generalizadas, que consiste na solução das equações desacopladas da ponte quando sujeita à passagem do veículo, pelo vetor de tensões modais *hot-spots* extraído do submodelo. Para analisar a influência da quantidade de modos de vibração sobre o cálculo final do espectro de tensões *hot-spots* no domínio do tempo, essa multiplicação considerou três diferentes quantidades de modos 500 modos (com frequências entre 1,86 Hz e 56,24 Hz), 1000 modos (com frequências entre 1,86 Hz e 77,34 Hz) e 2000 modos (com frequências entre 1,86 Hz e 117,44 Hz). Em teoria, a solução com mais modos aproximar-se-ia da solução integral caso o problema dinâmico fosse resolvido por integração direta Newmark, exclusivamente. Por outro lado, quanto menos se considerar, maior será a eficiência computacional do cálculo.

Inicialmente, destaca-se que o valor máximo de tensão hot-spot no submodelo para a velocidade de 40 km/h ocorreu ao se considerar 2000 modos, atingindo um valor máximo (tração) de 5,71 MPa, e um valor mínimo (compressão) de -3,48 MPa, ocorrendo em um intervalo inicial de 0 a 4 s. Nesta faixa de velocidade, ao se considerar 1000 modos e 500 modos, as tensões obtidas foram inferiores quando comparadas com as tensões ao se considerar 2000 modos. Considerando-se 1000 modos, a tensão hot-spot máxima foi de 3,84 MPa (tração), sendo a mínima de -3,23 MPa (compressão), estas ocorrendo em um intervalo de 3,5 s a 4 s. A análise com a consideração de 500 modos, apresentou os menores valores de tensões hot-spots, ocorrendo no intervalo entre 4,5 s a 5,5 s, com a intensidade de 2,94 MPa e -3,22 MPa, respectivamente, para tração e compressão. A Figura 9 apresenta os valores de tensões *hot-spots* calculadas para a velocidade do veículo trafegando sobre o tabuleiro metálico a 40 km/h na faixa central.

Considerando-se a velocidade do veículo em 60 km/h, observou-se que o submodelo, levando em conta 2000 modos, atingiu um pico de 5,71 MPa (tração) e um mínimo de -3,48 MPa (compressão), no intervalo inicial de 0 a 2,5 s, menor se comparado à velocidade de 40 km/h. Nessa mesma faixa de velocidade, as análises dinâmicas forçadas ao se considerar 1000 e 500 modos também apresentaram tensões menores quando comparadas ao se considerar 2000 modos. Adotando-se 1000 modos, a tensão hot-spot máxima foi de 3,85 MPa (tração) e a mínima de -3,25 MPa (compressão), ocorrendo entre 2,5 s e 3 s. De outra forma, a análise com 500 modos de vibração, que apresentou os menores valores de tensões hot-spots, registrou 2,94 MPa (tração) e -3,22 MPa (compressão), no intervalo de 3 s a 3,5 s. A Figura 10 apresenta os valores de tensões hot-spots do submodelo com o veículo trafegando com velocidade constante de 60 km/h.

Com a velocidade do veículo igual a 80 km/h, foram feitas até 2000 interpolações modais para o submodelo, divididas em intervalos de 500, 1000 e 2000 modos de vibração. O resultado máximo ao se considerar 2000 modos na análise dinâmica forçada foi de 5,68 MPa (tração) e -3,44 MPa (compressão), no intervalo de 1 s a 2 s, menor do que nas velocidades anteriores. Na mesma faixa de velocidade, as análises ao se considerarem 1000 e 500 modos, apresentam valores de tensões inferiores em comparação com as análises de 2000 modos, comportamento comum para todos os espectros de velocidades.

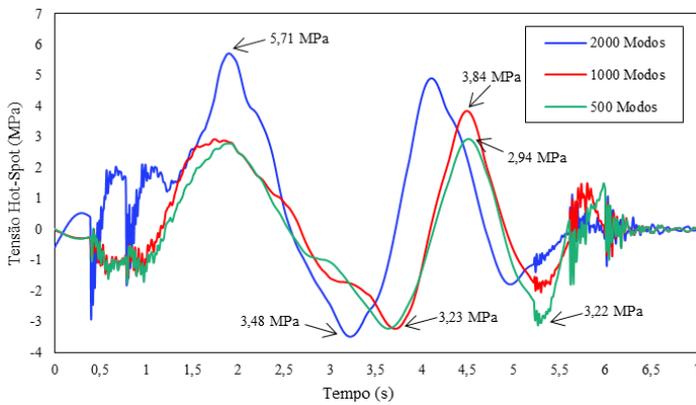


Figura 9 – Tensões *hot-spots* no submodelo (40 km/h). Veículo HL-93 na faixa central.

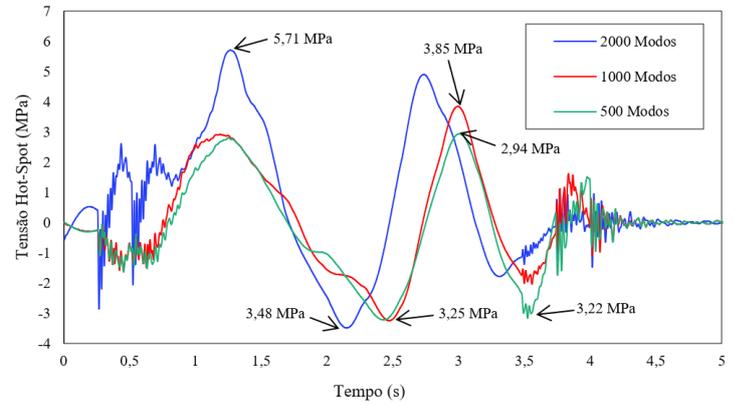


Figura 10 – Tensões *hot-spots* no submodelo (60 km/h). Veículo HL-93 na faixa central.

Ao se considerar 1000 modos, a tensão *hot-spot* máxima no submodelo foi de 3,88 MPa (tração) e a mínima de -3,24 MPa (compressão), ocorrendo entre 2 s e 2,5 s. Assim sendo, a análise com 500 modos de vibração, que apresentou os menores valores de tensões *hot-spots* em todos os casos, registrou 2,94 MPa (tração) e -3,22 MPa (compressão) no intervalo de 2,5 s a 3 s. Em seguida, a Figura 11 ilustra os valores de tensões *hot-spots* do submodelo com o veículo à velocidade constante de 80 km/h.

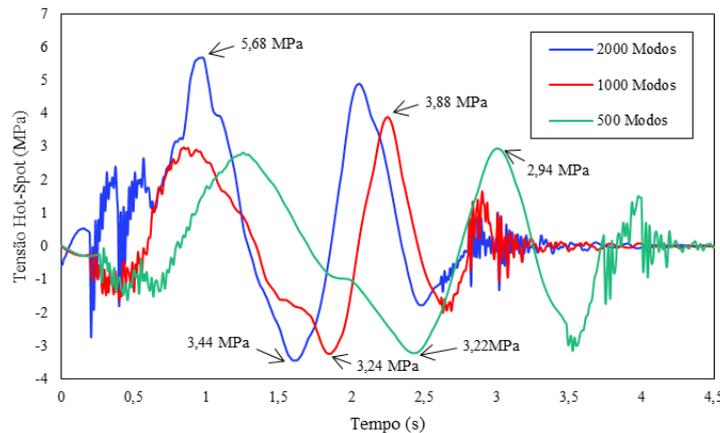


Figura 11 – Tensões *hot-spots* no submodelo (80 km/h). Veículo HL-93 na faixa central.

Ou seja, cabe ressaltar que quanto maior a velocidade de travessia do veículo, menor será o tempo para a incidência das tensões *hot-spots* sobre a estrutura da ponte. Contudo, a intensidade das tensões só aumentou quando foram considerados mais modos de vibração na multiplicação matricial entre a matriz de coordenadas modais generalizadas e o vetor de tensões modais *hot-spots*.

6. Conclusões

A análise das tensões *hot-spot* no submodelo, considerando diferentes velocidades do veículo trafegando sobre a faixa central do vão central metálico da ponte (40 km/h, 60 km/h e 80 km/h), demonstrou que o número de modos de vibração considerados no cálculo influencia diretamente a magnitude das tensões observadas. Em todos os cenários, a análise com 2000 modos resultou nos valores de tensões mais elevados, atingindo valores máximos de 5,71 MPa (tração) e -3,48 MPa (compressão) para a velocidade de 40 km/h. De outra forma, na medida em que o número de modos foi reduzido para 1000 e 500, as tensões diminuíram significativamente, com os menores valores registrados para 500 modos (2,94 MPa à tração e -3,22 MPa em compressão). Esse comportamento indica que a precisão da análise estrutural é diretamente proporcional ao número de modos considerados, mas também ressalta a importância de equilibrar a complexidade do modelo com a eficiência computacional, através da posterior calibração com dados experimentais e a realização de uma análise de sensibilidade modal, uma vez que dentre todos os 2000 modos nem todos contribuem significativamente para o cálculo das tensões locais no submodelo.

Além disso, observou-se que o aumento da velocidade do veículo resultou em uma redução no intervalo de tempo em que as tensões *hot-spot* atingiram seus valores máximos. Por exemplo, para 2000 modos, o intervalo de ocorrência das tensões máximas diminuiu de 0 a 4 s (40 km/h) para 1 s a 2 s (80 km/h). Esse comportamento sugere que, em velocidades mais altas, as cargas dinâmicas atuam de forma mais rápida e concentrada sobre a estrutura da ponte, exigindo maior atenção ao dimensionamento para evitar falhas por

fadiga ou ruptura. No entanto, a intensidade das tensões não aumentou significativamente com a velocidade, mas com o número de modos de vibração aplicados, reforçando a importância de uma modelagem adequada para capturar os efeitos dinâmicos. Os resultados evidenciam que, embora o aumento da velocidade do veículo reduza o tempo de exposição da estrutura às tensões *hot-spots*, a magnitude dessas tensões é mais sensível ao número de modos de vibração considerados na análise.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país: CAPES, CNPq e FAPERJ. Os autores agradecem também à NOVACAP (Nova Companhia Urbanizadora da Capital) pelo fornecimento dos projetos e pelo acesso ao vão central metálico para realização das medições experimentais durante as obras de reforço entre 2022 e 2024.

Referências

- AASHTO. Bridge Design Specifications. In American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- ALENCAR, G., De JESUS, A., & CALÇADA, R. Structural stress-based methodologies for fatigue assessment of welded railway bridges. *March*, 407, 2021.
- ALENCAR, G., de JESUS, A., da SILVA, J. G. S., & CALÇADA, R. Fatigue cracking of welded railway bridges: A review. *Engineering Failure Analysis*, 104, 2019.
- ALENCAR, G., de JESUS, A. M. P., CALÇADA, R. A. B., & SILVA J. G. S. d. Fatigue life evaluation of a composite steel-concrete roadway bridge through the hot-spot stress method considering progressive pavement deterioration. *Engineering Structures*, 166(February), 46–61, 2018.
- ALMEIDA, R. S. Análise de Vibrações em Pontes Rodoviárias Induzidas pelo Tráfego de Veículos sobre Pavimentos Irregulares. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia e Ciências Faculdade de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ, 2006.
- ALMEIDA, R. O. Recuperação, Reforço Estrutural Revitalização da Ponte Costa e Silva (Honestino Guimarães). Brasília: Governo do Distrito Federal. 2018.
- ALMEIDA, R., ALENCAR, G., BRITO, J., SAKIYAMA, F., VELOSO, L.. Model updating of an orthotropic steel deck based on field tests: a case study of Niemeyer's bridge. *Journal of Bridge Engineering (Under Review)*. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2025.
- ANSYS. Advanced Analysis Techniques Guide. ANSYS Inc., 2017.
- BARBOSA, A. G. A PONTE MONUMENTAL DE NIEMEYER : Narrativa e imaginário como campos de disputas por meio de uma nomenclatura. 1–26, 2022.
- DENG, L., & CAI, C. S. Development of dynamic impact factor for performance evaluation of existing multi-girder concrete bridges. *Engineering Structures*, 32(1), 21–31, 2010.
- DODDS, C. J., & ROBSON, J. D. The description of road surface roughness. *Journal of Sound and Vibration*, 31(2), 175–183, 1973.
- EN 1993 1-9. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue, 1–9. 2005.
- HOBBACHER, A. F. The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components - A comprehensive code recently updated. *International Journal of Fatigue*, 31(1), 50–58, 2009.
- LIU, W. K., Li, S., & PARK, H. S. Eighty Years of the Finite Element Method: Birth, Evolution, and Future. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022.
- MATLAB, Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.; 2018.
- RAMOS, T. H. S. Análise estrutural dinâmica não determinística e verificação de projeto à fadiga do vão central da ponte Honestino Guimarães (Brasília/DF). Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Rio de Janeiro, RJ, 2025.
- RIBEIRO, D. R. F. Efeitos dinâmicos induzidos por tráfego em pontes ferroviárias: modelação numérica, calibração e validação experimental. 500, 2012.
- SILVA, A. C. S. Estudo do comportamento dinâmico de pontes rodoviárias mediante avaliação da deterioração progressiva do pavimento. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia e Ciências Faculdade de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ, 2020.
- STOURA, C. D., Paraskevopoulos, E., Dimitrakopoulos, E. G., & Natsiavas, S. A Dynamic Partitioning Method to solve the vehicle-bridge interaction problem. *Computers and Structures*, 251, 2021.
- ZHANG, W., Cai, C. S., & Pan, F. Nonlinear fatigue damage assessment of existing bridges considering progressively deteriorated road conditions. *Engineering Structures*, 56, 1922–1932, 2013.
- ZHUANG, M., Miao, C., & Chen, R. Fatigue performance analysis and evaluation for steel box girder based on structural health monitoring system. *SDHM Structural Durability and Health Monitoring*, 14(1), 51–79, 2020.