

Inspeção extraordinária e monitoramento dinâmico de obra de arte especial em concreto protendido com dentes Gerber: estudo de caso da Ponte sobre o Estreito dos Mosquitos (BR-135/MA)

FÁBIO PESSOA DA SILVA NUNES - DIR. DE INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA - (fabio.nunes@dnit.gov.br) - <https://orcid.org/0009-0003-6601-0084> ;

MARIA HELENA FERRER - ENG³ - <https://orcid.org/0000-0003-3326-2042> ;

ALEXANDRE GIL BATISTA DE MEDEIROS - COORD. DE MANUTENÇÃO DE ESTRUTURAS E CONTENÇÕES - <https://orcid.org/0009-0005-7861-9203> – DNIT

PABLO JUAN LOPES E SILVA SANTOS - ENG. - <https://orcid.org/00000-0002-4939-5184> – Consórcio InfraGestão Rodoviária

RESUMO

A PONTE SOBRE O ESTREITO DOS MOSQUITOS (BR-135/MA), COM 459 M EM SEÇÃO CILINDRICA DE CONCRETO PROTENDIDO E ANTIGOS DENTES GERBER SOLIDARIZADOS, FOI SUBMETIDA A INSPEÇÃO EXTRAORDINÁRIA E A MONITORAMENTO DINÂMICO APÓS ALERTA DE MOVIMENTAÇÃO OBTIDO POR MONITORAMENTO ORBITAL. ESTE ARTIGO APRESENTA O ESTUDO DE CASO, INTEGRANDO AVALIAÇÃO VISUAL, AEROLEVANTAMENTO POR DRONE, MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS E IDENTIFICAÇÃO MODAL OPERACIONAL (OPERATIONAL MODAL ANALYSIS - OMA) DE BAIXO CUSTO, COM ACCELERÔMETRO DE SMARTPHONE E TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT). A REAVALIAÇÃO DE CARGA INDICOU ACRÉSCIMO DE 21,6% NO MOMENTO NEGATIVO E DE 48,7% NO MOMENTO POSITIVO AO SE ATUALIZAR O TREM-TIPO DE TB-36 PARA TB-45. O MODELO NUMÉRICO ADERIU À REFERÊNCIA EMPÍRICA COM DESVIO DE 2,9% NO VÃO CENTRAL; AS FREQUÊNCIAS EXPERIMENTAIS, INFERIORES ÀS NUMÉRICAS, INDICARAM PERDA DE RIGIDEZ DE 27,9% NA REGIÃO DO ANTIGO DENTE GERBER DO LADO SÃO LUÍS, CONTRA 7,1% NO LADO OPOSTO DA MESMA OBRA. A ESTRUTURA FOI CLASSIFICADA COMO CRÍTICA (NOTA 1, DNIT 010/2024-PRO), RECOMENDANDO-SE INTERDIÇÃO PARCIAL. A CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO ESTÁ EM DEMONSTRAR QUE A ESTIMATIVA QUANTITATIVA DE PERDA DE RIGIDEZ LOCALIZADA EM OAE DE GRANDE PORTE É OBTENÍVEL EM CAMPANHA PONTUAL, COM INSTRUMENTAÇÃO DE CUSTO DESPREZÍVEL, QUANDO

ANCORADA EM MODELO NUMÉRICO E EM REFERÊNCIA EMPÍRICA INDEPENDENTE.

PALAVRAS-CHAVE: MONITORAMENTO DINÂMICO, OBRAS DE ARTE ESPECIAIS, DENTES GERBER, IDENTIFICAÇÃO MODAL OPERACIONAL, INSPEÇÃO DE PONTES.

1. INTRODUÇÃO

A malha rodoviária federal brasileira abriga milhares de Obras de Arte Especiais (OAEs) construídas há décadas, muitas concebidas com soluções estruturais hoje reconhecidas como problemáticas. Entre elas, destacam-se as pontes com longos balanços e articulações do tipo dente Gerber, sensíveis à deformação lenta, às cargas móveis e à vibração excessiva, e cuja manutenção das juntas é historicamente crítica. A literatura recente confirma essa criticidade. Santarsiero, Picciano e Masi (2025), em revisão do estado da arte sobre reabilitação de dentes Gerber em pontes de concreto armado, apontam a região do dente como a de inspeção mais difícil e de maior acúmulo de agentes deletérios; Di Carlo *et al.* (2023) mediram experimentalmente a perda de capacidade associada à corrosão da armadura nesses consolos; e De Domenico *et al.* (2024), analisando por método não linear um conjunto de viadutos rodoviários com meio século de uso,

mostraram que a deterioração local do dente governa a capacidade última do vão. O acervo brasileiro reproduz esse padrão.

O diagnóstico dessas estruturas apoia-se, cada vez mais, em técnicas de monitoramento da integridade estrutural (*Structural Health Monitoring* - SHM) baseadas em vibração, cuja premissa é que a perda de rigidez altera as propriedades modais. As revisões de Avci *et al.* (2021) e de Sun *et al.* (2023) sistematizam o campo e registram que a frequência natural, embora indicador global e sensível a efeitos ambientais, permanece o parâmetro mais robusto para triagem em campo. A identificação modal operacional (OMA), que extrai esses parâmetros da resposta sob excitação ambiental e de tráfego, dispensa excitação controlada e é, por isso, adequada a pontes em operação. Paralelamente, a comparação entre resposta medida e modelo numérico constitui a base da atualização de modelos em elementos finitos (*Finite Element Model Updating*), aplicada por Svendsen *et al.* (2023) a ponte metálica em escala real com redução expressiva do desvio entre modelo e experimento.

A barreira de custo da instrumentação vem sendo removida pelo uso de acelerômetros de smartphone. Ozer e Kromanis (2024) revisam as aplicações em pontes

e concluem pela adequação dos sensores embarcados à identificação dos primeiros modos; McSweeney *et al.* (2024) compararam medições estacionárias e embarcadas em veículo, obtendo as frequências modais por ambos os arranjos; e Massarelli *et al.* (2026) automatizaram a OMA a partir de dados colaborativos de smartphones. No campo da inspeção, Panigati *et al.* (2025) e Chand *et al.* (2026) documentam a consolidação do aerolevantamento por aeronave remotamente pilotada como meio de acesso a regiões antes inspecionáveis apenas com equipamento especial. O que a literatura ainda documenta pouco é a operação conjunta dessas quatro frentes — inspeção visual normatizada, drone, modelo em elementos finitos e OMA de baixo custo — dentro de um único evento de inspeção extraordinária e com desfecho decisório. É essa integração que o presente trabalho relata.

A Ponte sobre o Estreito dos Mosquitos, na BR-135/MA, é um exemplo emblemático. Com 459 m de extensão em seção celular de concreto protendido, aberta ao tráfego em 1972, a estrutura foi concebida com balanços sucessivos de 20,8 m a 48,0 m e dentes Gerber, tendo recebido intervenções relevantes de reforço por protensão externa em 2004 e 2017. Apesar disso, mantém comportamento estrutural crítico,

especialmente nos vãos onde os antigos dentes Gerber foram solidarizados. A Figura 1 mostra o mapa de situação da OAE.

Diante de alerta de movimentação proveniente de monitoramento por satélite — objeto do artigo que acompanha o presente trabalho —, realizou-se inspeção extraordinária da OAE entre 23 e 25 de fevereiro de 2026. Este artigo apresenta o estudo de caso resultante, com ênfase na metodologia integrada de diagnóstico: inspeção visual, aerolevantamento por drone, modelagem numérica em elementos finitos, reavaliação de carga frente ao trem-tipo atual e identificação modal operacional de baixo custo para estimativa de perda de rigidez. A contribuição pretendida é dupla: demonstrar que a estimativa quantitativa de perda de rigidez localizada, usualmente associada a sistemas de monitoramento permanentes, é obtível em campanha pontual com acelerômetro de smartphone, desde que validada contra referência empírica independente e modelo numérico; e mostrar que essa estimativa, cruzada com a reavaliação de carga normativa, sustenta decisão de restrição de tráfego em prazo compatível com a urgência do alerta. O texto organiza-se em desenvolvimento — estrutura, método, manifestações patológicas, reavaliação de carga e monitoramento dinâmico —, discussão dos resultados frente à literatura e conclusões.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 A estrutura e seu histórico

A ponte localiza-se no km 24,40 da BR-135/MA, possui 9,85 m de largura, duas faixas de rolamento sem acostamento e foi projetada para o trem-tipo TB-36, conforme a NB-2 de 1961, contemporânea da NB-1 de 1960, então vigente para o cálculo de peças de concreto armado. A superestrutura é uma seção celular de altura variável, executada por balanços sucessivos, com tabuleiro em concreto protendido sobre infraestrutura e mesoestrutura em concreto armado.

Desde os primeiros anos de uso, registraram-se manifestações associadas à concepção original: relatórios de 1988 e de 2003 apontaram deformações excessivas nos balanços, vibrações e risco de colapso, qualificando o arranjo como projeto inadequado. Em 2004, após o surgimento de fenda em um dos vãos e a interdição ao tráfego pesado, executou-se reforço por protensão externa, solidarização dos dentes Gerber e implantação de apoios adicionais nas extremidades, com escoramento provisório. Em 2016, a OAE foi classificada em condição crítica e, em 2017, recebeu novo reforço com protensão externa e transversal nos vãos Gerber. A última inspeção rotineira, em novembro de 2025, atribuiu Nota 2 (ruim). A Figura 2 mostra

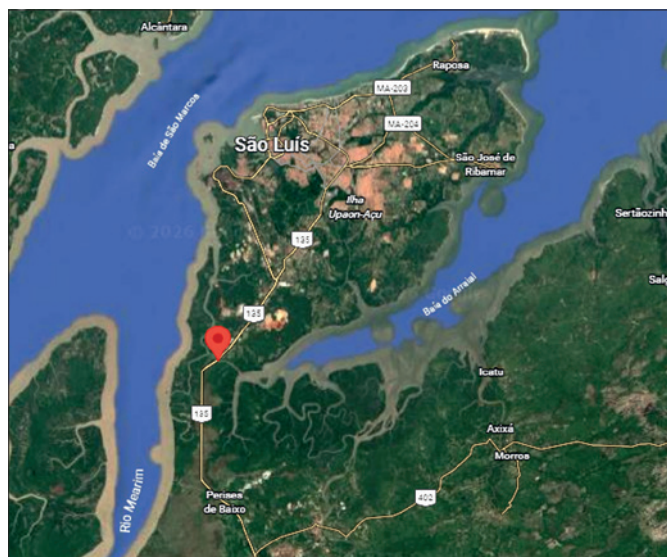


FIGURA 1
LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA OAE

FONTE: GOOGLE EARTH



FIGURA 2
VISTA DA PROTENSÃO POSITIVA EXTERNA ADICIONAL AOS DENTES GERBER

FONTE: AUTORES

a protensão positiva externa adicionada aos dentes Gerber.

2.2 Metodologia da inspeção extraordinária

A inspeção seguiu a Norma DNIT 010/2024-PRO e o Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias (DNIT, 2004), com avaliação visual direta da infraestrutura, da mesoestrutura e da superestrutura, incluindo os trechos acessíveis da seção celular e ênfase na região crítica entre os apoios P4-P5 e P6-P7. Os pontos inacessíveis foram cobertos por aerolevantamento com aeronaves remotamente pilotadas (DJI Mini 3 Pro e Mini 5 Pro), sob os protocolos da ANAC e do DECEA, totalizando 64 registros — arranjo alinhado à prática revisada por Panigati *et al.* (2025).

Adicionalmente, elaborou-se modelo numérico em elementos finitos para análise estática e modal (Figura 3) e realizou-se monitoramento dinâmico *in loco* com o acelerômetro triaxial de smartphone, por meio do aplicativo Phyphox (Staacks *et al.*, 2018), sob excitação de tráfego pesado. O sinal foi processado por Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obtenção das densidades espectrais de potência, das quais se extraíram as frequências dos primeiros modos. Trata-se, portanto, de identificação modal operacional: a excitação não é controlada nem medida.

O modelo numérico foi elaborado em software de elementos finitos. O modelo constitutivo adotado para o concreto foi não linear, baseado em curva tensão-deformação uniaxial com a resistência à compressão característica (f_{ck}) de 25 MPa e representativa de ensaios uniaxiais à compressão do material. O módulo de elasticidade foi calculado conforme a formulação apresentada na NBR 6118:2023, item 8.2.8, a partir do f_{ck} extraído de informações do projeto executivo da Obra de Arte Especial, cujo valor obtido foi de $E_c = 5600 \sqrt{f_{ck}} = 28 \text{ GPa}$.

Para a modelagem da Viga Caixão, adotou-se elementos de casca ("Shell") e para os pilares, utilizou-se elementos de viga ("Frame").

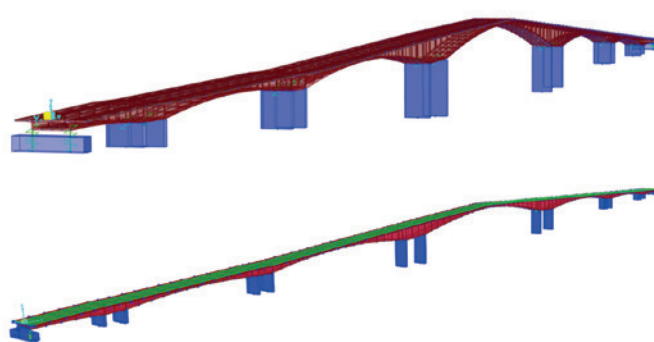


FIGURA 3

MODELO NUMÉRICO E VISUALIZAÇÃO DA IMPOSIÇÃO DE CARGA MÓVEL ATRAVÉS DE LANES

FONTE: AUTORES

O experimento se iniciou com a abertura de aplicativo *Phyphox* e visualização da interface inicial. Ao clicar no ícone '+' e posteriormente em 'adicionar experimento simples', abre-se aba para configuração do experimento. Então, procedeu-se com a indicação da taxa de leitura do sensor utilizada de 20 hz, em que apenas o sensor tipo acelerômetro ficou ativo. A duração das leituras foi, em média, de 60 segundos, tempo suficiente e exequível para captar a excita-

ção do tráfego pesado e sua aceleração instantânea, considerando a operação com o celular sobre o tabuleiro. A Figura 4 ilustra o procedimento inicial de operação no aplicativo.

2.3 Principais manifestações patológicas

Na infraestrutura, as estacas originais estão totalmente enterradas e sem informações dimensionais em projeto, o que impede estimar diretamente sua capacidade resistente; a ausência de recalques aparentes em cerca de 55 anos de uso sugere desempenho adequado, ressal-

vada a impossibilidade de inspeção direta. Os apoios acrescentados em 2004, em estacas escavadas de 100 cm de diâmetro e 40 a 41 m de profundidade, apresentam-se íntegros.

Na mesoestrutura, observou-se fissuração nos apoios de 2004, mais intensa no lado norte (São Luís), e deslocamento dos aparelhos de apoio em direção aos encontros, associado ao alongamento da OAE e à variação térmica. A folga insuficiente das bainhas da protensão vertical resultou em

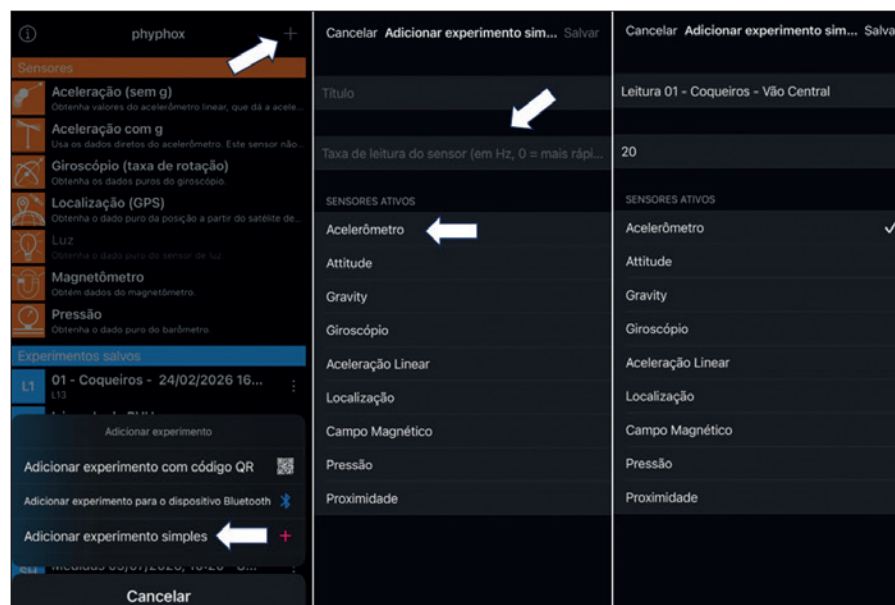


FIGURA 4

PARÂMETROS DE ENTRADA NO APLICATIVO *PHYPHOX*

FONTE: AUTORES

esmagamento dos tubos, sempre na direção do encontro. São críticos os pilares esbeltos P3, P4, P9 e P10, com destaque para a assimetria entre o P8 – ampliado de 50 cm para 82 cm com armadura complementar em 2004 – e o P9 adjacente, mantido na seção original de 30 cm. Os elementos mais preocupantes são o P4 e o P9.

Nos encontros, a extensa camada de solo mole provoca recalques recorrentes e o descalçamento das lajes de aproximação. O encontro norte rompeu-se, atribuindo-se a causa às sucessivas aplicações de revestimento betuminoso que elevaram o empuxo horizontal acima da resistência da cortina, agravadas pela dilatação térmica de uma superestrutura contínua de 459 m, executada praticamente como peça única.

Na superestrutura, registram-se fissuras nas paredes da seção celular, de espessura inferior ao usual, infiltrações generalizadas, desalinhamento nas uniões dos antigos dentes Gerber – resultante da torção sofrida no episódio de 2004 – e degradação avançada do passeio e do guarda-corpo. A Figura 5 mostra a fissuração que se propaga na laje de fundo da seção celular. Os cabos de protensão alojados na face superior da laje, solução já considerada não ortodoxa em 1988, foram reportados a 7 cm da superfície, expostos e corroídos. As deformações na região dos dentes Gerber mostraram-se persistentes na comparação cronológica entre 2004, 2016 e 2026.

2.4 Reavaliação da capacidade de carga

Para avaliar o impacto da evolução normativa, o modelo numérico foi submetido ao trem-tipo de projeto TB-36 (NB-2/1961) e ao trem-tipo vigente TB-45 (NBR 7188:2024), com os coeficientes de segurança da NB-2/1961 ajustados de modo proporcional aos critérios da NBR 8681, ponderando as contribuições do aço e do concreto. A Tabela 1 resume os esforços de flexão obtidos no vão lateral entre os apoios P2 e P3. A leitura dos critérios da NB-2/1961 apoiou-se nas notas de Langendock (s.d.) sobre o cálculo de lajes contínuas de pontes na fase plástica.

Os acréscimos de 21,6% no momento negativo e de 48,7% no positivo evidenciam que a estrutura, dimensionada para o TB-36, encontra-se em desvantagem



FIGURA 5
FISSURAS DE ESTADO LIMITE ÚLTIMO NA MESA INFERIOR DA SEÇÃO CAIXÃO
FONTE: AUTORES

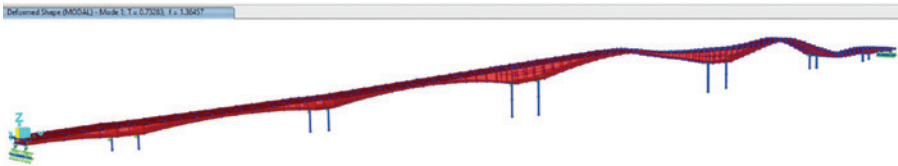


FIGURA 6
PRIMEIRO MODO DE FLEXÃO VERTICAL DO VÃO CENTRAL OBTIDO NO MODELO NUMÉRICO (1,36 Hz), COM DESVIO DE 2,9% EM RELAÇÃO À REFERÊNCIA EMPÍRICA DE Li et al. (2014)
FONTE: AUTORES

frente às solicitações do trem-tipo atualmente vigente.

2.5 Monitoramento dinâmico e perda de rigidez

A frequência natural de referência do primeiro modo de flexão vertical foi estimada empiricamente pela Equação 1, proposta por Li et al. (2014), resultando em 1,40 Hz para o vão central (L = 106,5 m).

[1] $f = 43,871 \cdot L^{-0,738}$

[2] $f_{1v-lateral} = \frac{(1,15 \sim 1,30) \cdot f_{1v-central}}{2} \cdot 1,40 = 1,715 \text{ Hz}$

O modelo numérico forneceu frequência natural de 1,36 Hz, conforme mostrado na Figura 6, com desvio de 2,9% em relação ao valor referencial, indicando boa correlação. Para o vão lateral que contém o dente Gerber danificado, foi utilizada a Equação 2, que forneceu a frequência empírica de 1,715 Hz, contra 1,66 Hz do modelo, com variação de 3,31%.

TABELA 1
MOMENTOS FLETORES PARA OS TRENS-TIPO TB-36 E TB-45 (VÃO LATERAL P2-P3)

Solicitação	Projeto (TB-36)	TB-45 (NBR 7188:2024)	Variação
Momento negativo (topo do P3)	334.650 kN·m	406.974 kN·m	+21,6%
Momento positivo (vão P2-P3)	23.616 kN·m	35.107 kN·m	+48,7%

FONTE: AUTORES

As frequências experimentais, obtidas por FFT das acelerações medidas sob tráfego pesado, foram inferiores às numéricas, indicando perda de rigidez. Os espectros por trecho são mostrados na Figura 7; em cada um, o pico do primeiro modo de flexão vertical do trecho instrumentado foi identificado pela faixa de frequência esperada para o vão correspondente, e não pela amplitude máxima do espectro, dominada por componentes de excitação do tráfego. Nos painéis medidos sobre os dentes Gerber aparece também o pico de 1,29 Hz do vão

central, modo global que se propaga pela superestrutura contínua; a leitura de rigidez local emprega o pico do vão lateral, único comparável à frequência numérica de 1,66 Hz daquele trecho. Admitindo massa e forma modal invariantes entre o modelo e a estrutura real, a razão entre a rigidez residual e a rigidez íntegra é dada pelo quadrado da razão entre as frequências experimental e numérica, conforme a Equação 3. A Tabela 2 sintetiza os resultados.

$$[3] \quad K_{res} / K_0 = (f_{exp} / f_{num})^2$$

A perda de rigidez de 27,9% na região do antigo dente Gerber do lado São Luís é expressivamente elevada e coerente com as deformações e fissuras observadas naquele trecho. Chama atenção o contraste com o lado continente (7,1%), sujeito ao mesmo tráfego e à mesma geometria: a assimetria reproduz, no comportamento dinâmico, a assimetria já registrada na inspeção visual — desalinhamento das uniões e histórico de torção concentrados no lado São Luís. O registro temporal da

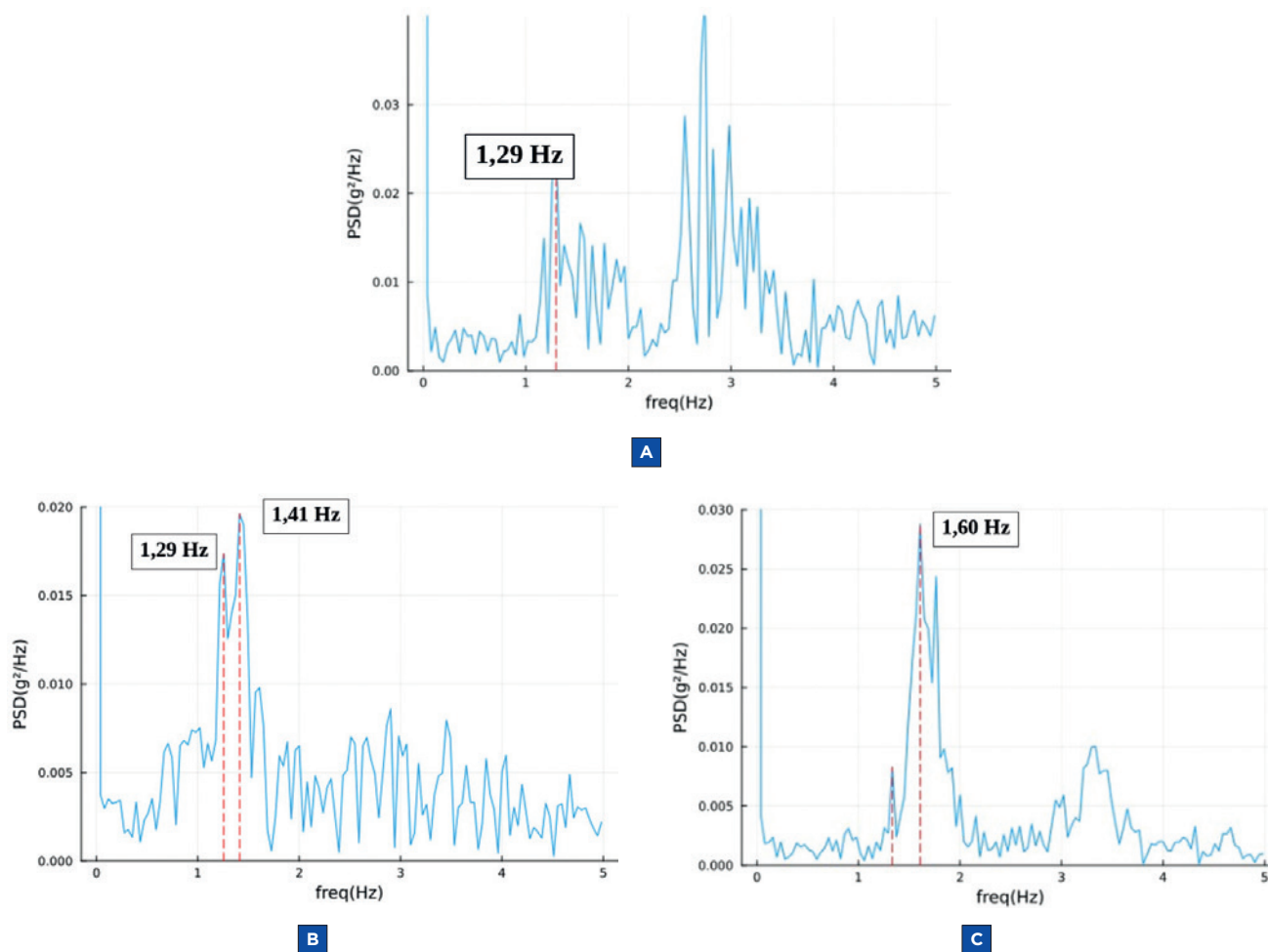


FIGURA 7

DENSIDADES ESPECTRAIS DE POTÊNCIA SOB TRÁFEGO PESADO, COM O PICO DO PRIMEIRO MODO DE FLEXÃO VERTICAL ASSINALADO: A) VÃO CENTRAL (1,29 Hz); B) DENTE GERBER, LADO SÃO LUÍS (1,41 Hz); C) DENTE GERBER, LADO CONTINENTE (1,60 Hz).

EM (B) REGISTRA-SE TAMBÉM O PICO DE 1,29 Hz DO MODO GLOBAL DO VÃO CENTRAL.

O AFASTAMENTO DO PICO DO VÃO LATERAL EM (B), 1,41 Hz FRENTE AO VALOR NUMÉRICO DE 1,66 Hz, É A EVIDÊNCIA DA PERDA DE RIGIDEZ LOCALIZADA

FONTE: AUTORES

TABELA 2

FREQÜÊNCIAS DE REFERÊNCIA E PERDA DE RIGIDEZ ESTIMADA POR REGIÃO

Região	f empírica (Hz)	f numérica (Hz)	f experimental (Hz)	Perda de rigidez
Vão central	1,39	1,36	1,29	10,0%
Gerber - lado São Luís	1,70	1,66	1,41	27,9%
Gerber - lado continente	1,70	1,66	1,60	7,1%

FONTE: AUTORES

aceleração no vão central é apresentado na Figura 8. A série exibe componente contínua da ordem de $9,81 \text{ m/s}^2$ sobreposta a oscilação de aproximadamente $-0,15 \text{ m/s}^2$ a $+0,09 \text{ m/s}^2$. Como o canal de medição não foi calibrado nem compensado quanto à orientação do aparelho, o sinal é aqui empregado exclusivamente como fonte das frequências modais, e não como medida de amplitude de vibração.

Um exercício de estimativa de peso bruto total admissível, considerando o coeficiente de impacto, a majoração ajustada, a perda de rigidez e o excedente de momento negativo do TB-45, conduziu a cerca de 35 t de PBT.

Nesse cálculo, obteve-se inicialmente o valor base do PBT do TB36 majorado, o qual foi considerado em projeto da OAE. De acordo com o normativo vigente à época, a norma NB-2 1961, a majoração de cargas variáveis se dava pelo seguinte fator ($2,0\phi$). Entretanto, tal norma não considerava minoração da resistência do concreto. Como forma de possibilitar a adequação dos resultados para os critérios modernos, divide-se a majoração descrita por 1,4 (coeficiente minorador da resistência do concreto pela NBR 6118:2023), obtendo-se o valor $1,43\phi$ (ϕ é o coeficiente de impacto de 1,3 admitido para a NB-2). Conjuntamente, reduz-se o valor base pela perda de rigidez no Gerber entre apoios 2 e 3 (27,92%), pela variação percentual máxima de momentos fletores negativos (igual a 21,61%) devido à atualização normativa, e pela perda estimada de rigidez do Gerber no Lado Continente (7,11%). Por fim, obtém-se a seguinte expressão para o PBT admissível, conforme Equação 4. Os coeficientes advêm dos coeficientes majoradores

descritos ou das unidades subtraídas da representação decimal das perdas supracitadas. Diante das incertezas e do estado crítico da estrutura, entretanto, a recomendação adotada foi a restrição do tráfego pesado, e não a fixação de um limite de carga.

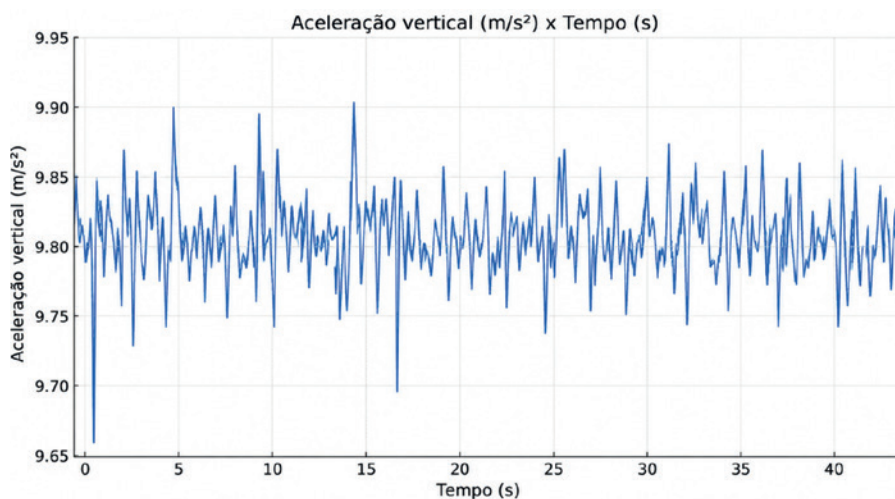
$$[4] \quad PBT = 36 \times 1,3 \times 1,43 \times 0,7208 \times 0,7839 \times 0,9289 = 35,12 \text{ t}$$

3. DISCUSSÃO

A aderência entre a referência empírica de Li *et al.* (2014) e o modelo numérico — 2,9% no vão central e 2,4% no vão lateral — é o primeiro resultado a discutir. A expressão empregada foi ajustada sobre um acervo de pontes rodoviárias chinesas, e sua transposição para uma

seção celular brasileira de 1972 não é automática: a concordância obtida deve ser lida como verificação cruzada de ordem de grandeza, não como validação do modelo. Ainda assim, a convergência entre duas estimativas independentes autoriza empregar a frequência numérica como referência de estrutura íntegra, na ausência da atualização formal do modelo a partir de dados medidos que Svendsen *et al.* (2023) descrevem como o procedimento adequado para essa finalidade.

A perda de rigidez de 27,9% no dente Gerber do lado São Luís decorre de queda de 15,1% na frequência do primeiro modo. A ordem de grandeza é compatível com o que a literatura de detecção de dano baseada em vibração associa a dano estrutural significativo. Sun *et al.* (2023) registram que a variação de frequência atribuível a fatores ambientais e operacionais é usualmente da ordem de 5% a 10%, e que a alteração induzida por dano deve, no mínimo, superar 5% para ser distinguível dessa flutuação. Os 15,1% medidos superam com folga essa faixa. Já a queda de 3,6% do lado continente, correspondente aos 7,1% de perda de rigidez, situa-se abaixo do piso de 5% e não deve ser lida como dano detectado, e sim como o comportamento

**FIGURA 8**

SÉRIE TEMPORAL DA ACELERAÇÃO VERTICAL REGISTRADA NO VÃO CENTRAL SOB TRÁFEGO PESADO, BASE DO ESPECTRO DA FIGURA 7A QUE IDENTIFICOU O MODO DE FREQUÊNCIA 1,29 Hz

FONTE: AUTORES

de referência do trecho homólogo. Mais relevante, o contraste interno entre os dois dentes Gerber — 27,9% contra 7,1%, medidos no mesmo dia e sob o mesmo tráfego — elimina a temperatura e a variação operacional como explicações concorrentes, justamente a fragilidade que aquelas revisões apontam como principal nos indicadores globais de frequência.

O achado converge com a literatura específica sobre dentes Gerber. Di Carlo *et al.* (2023) quantificaram em laboratório a degradação de capacidade dos consolos sob corrosão de armadura, e De Domenico *et al.* (2024) mostraram, para viadutos de idade comparável à da OAE em estudo, que a deterioração local do dente governa a capacidade última do vão. No caso presente, a solidarização executada em 2004 e o reforço por protensão externa de 2017 não devolveram à região a rigidez de um trecho monolítico: a assinatura dinâmica indica que a descontinuidade original permanece estruturalmente ativa. O resultado tem interesse prático direto, porque a solidarização de dentes Gerber é solução corrente de reabilitação no acervo brasileiro, e a revisão de Santarsiero, Picciano e Masi (2025) já registrava a escassez de verificação de desempenho após esse tipo de intervenção.

Quanto ao meio de medição, os resultados são coerentes com o documentado para acelerômetros de smartphone. Ozer e Kromanis (2024) delimitam a aplicabilidade desses sensores aos primeiros modos, faixa em que a resolução e a taxa de amostragem dos dispositivos são suficientes — exatamente a faixa explorada aqui, de 1,3 a 1,6 Hz. McSweeney *et al.* (2024) e Massarelli *et al.* (2026) obtiveram frequências modais confiáveis com arranjos igualmente não calibrados. A limitação, comum a todos, é que o método fornece frequência, não amplitude absoluta nem forma modal, o que restringe seu uso à comparação relativa — que é precisamente o uso feito neste trabalho. De acordo com Sarmadi *et al.* (2023), enquanto os acelerômetros de contato tradicionais são frequentemente divididos em classes como *force-balance*

(servo), piezoelétricos e capacitivos, os sensores integrados aos dispositivos móveis baseiam-se em Sistemas Microeletromecânicos (MEMS) do tipo capacitivo. Essa diferença metodológica e funcional permite que os dispositivos móveis capturem acelerações constantes como gravitacional, variáveis e quase estáticas em três eixos direcionais (X, Y e Z), registrando dados que refletem propriedades estruturais locais e globais em uma ampla faixa de frequência. Tais acelerômetros MEMS apresentam medições e respostas com acurácia, especialmente para frequências abaixo de 20 Hz. O aplicativo Phyphox, utilizado nas medições que baseiam este trabalho, se conecta aos sensores de smartphones para realizar medições, os quais tipicamente se caracterizam como MEMS.

A contribuição do estudo não está em nenhuma das quatro técnicas isoladamente, todas consolidadas, mas no acoplamento entre elas dentro de um único evento de inspeção: o alerta orbital define onde olhar; a inspeção visual e o drone caracterizam a manifestação patológica e delimitam a região suspeita; o modelo numérico fornece a referência de estrutura íntegra e a reavaliação de carga frente ao TB-45; e a OMA de baixo custo converte a suspeita qualitativa em um número comparável entre regiões da mesma obra. O custo marginal dessa última etapa é desprezível frente ao de um sistema de monitoramento permanente, o que a torna replicável em escala de acervo, e não apenas em obras singulares. A literatura técnica apresenta outras formas de detecção de dano, derivadas da aplicação de *Machine Learning*, *Deep Learning* e metodologias diversas para tratar dados obtidos por monitoramento, especialmente acelerações. Neste cenário, podem ser citados, aplicativo wireless para smartphone, capaz de detectar danos por fissuração devido à fadiga em placas usando acústica não linear (Oraczewski, T., Staszewski, W. J., & Uhl, T., 2016), método inovador de estimativa de limiar para o problema de localização de danos, utilizando o conceito de Cadeia de Markov de Monte Carlo (Entezami, A., Sarmadi, H., & De Michele, C., 2022).

Finalmente, metodologias avançadas de identificação de danos estruturais

que transcendem a análise de frequências e a estimativa de perda de rigidez propostas neste estudo apresentam alta complexidade operacional. Tais métodos frequentemente demandam instrumentação indisponível para inspeções em locais de difícil acesso, as quais são comumente executadas por equipes locais sob caráter de urgência e iminente risco de colapso estrutural. À vista disso, a integração da inspeção visual ao uso de drones e a medições frequenciais localizadas consolida-se como uma abordagem viável, prática e eficaz para a avaliação de Obras de Arte Especiais (OAEs).

4. CONCLUSÕES

A inspeção extraordinária e o monitoramento dinâmico da Ponte sobre o Estreito dos Mosquitos resultaram em classificação crítica (Nota 1, DNIT 010/2024-PRO), com mesoestrutura e superestrutura críticas e infraestrutura e encontros em condição ruim. A reavaliação de carga indicou acréscimo de solicitação de 21,6% no momento negativo e de 48,7% no positivo frente ao TB-45, e a identificação modal operacional quantificou perda de rigidez de 27,9% na região do antigo dente Gerber do lado São Luís, contra 7,1% no lado oposto da mesma obra.

Recomendaram-se a interdição parcial da OAE, com liberação apenas de veículos leves e dispositivo de restrição de altura para impedir a passagem de veículos pesados, além de ensaios de caracterização do concreto, ensaio termográfico na região dos dentes Gerber e monitoramento dinâmico periódico durante a interdição.

A principal contribuição do trabalho é metodológica. Demonstra-se que a integração, em um único evento de inspeção, entre alerta orbital, inspeção visual normatizada, aerolevantamento por drone, modelo em elementos finitos e identificação modal operacional com acelerômetro de smartphone converte uma suspeita qualitativa em estimativa quantitativa de perda de rigidez localizada, suficiente para fundamentar decisão de restrição de tráfego. A comparação interna entre duas regiões homólogas da mesma obra, medidas no mesmo dia e sob o mesmo tráfego, mostrou-se o

recurso decisivo para contornar a sensibilidade dos indicadores de frequência a efeitos ambientais e operacionais.

As limitações delimitam o alcance do resultado: canal único não calibrado, campanha sem repetição em condições térmicas distintas, ausência de atualização formal do modelo numérico a partir dos dados medidos e ausência de ensaios de caracterização dos materiais. O procedimento não substitui monitoramento permanente nem prova de carga;

qualifica-se como triagem quantitativa.

Quanto à replicabilidade, o custo marginal da etapa dinâmica e a dispensa de interrupção do tráfego tornam o procedimento aplicável ao conjunto de OAEs de concepção análoga — pontes em balanços sucessivos com dentes Gerber solidarizados —, particularmente como filtro de priorização acionado por sistemas de alerta precoce. Recomenda-se, em desenvolvimentos futuros, a medição multicanal simultânea, a repetição

sazonal das campanhas e a atualização do modelo numérico a partir dos dados medidos, de modo a localizar a perda de rigidez em nível de elemento.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação-Geral de Manutenção e Restauração Rodoviária (CGMRR) e à Coordenação de Manutenção de Estruturas e Contenções (COMEC) do DNIT, e à equipe da Unidade Local de Pedrinhas/MA pelo apoio logístico à inspeção. ☺

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AVCI, O.; ABDELJABER, O.; KIRANYAZ, S.; HUSSEIN, M.; GABBOUJ, M.; INMAN, D. J. A review of vibration-based damage detection in civil structures: from traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 147, art. 107077, 2021. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107077.
- [2] CHAND, B.; AYELE, F.; PINEIRO-DAKERS, I.; SAMSAMI, R.; CHANG, B. Uncrewed Aerial System (UAS) applications in bridge inspection: a comprehensive review of platforms, sensors, and operational effectiveness. *Drones*, v. 10, n. 2, art. 144, 2026. DOI: 10.3390/drones10020144.
- [3] DE DOMENICO, D.; SPINELLA, N.; MESSINA, D.; MAZZEO, M.; RECUPERO, A. Structural behavior of deteriorated Gerber half-joints in highway overpasses by nonlinear finite element analysis combined with a simplified uniform-corrosion model. *Structural Concrete*, v. 26, n. 5, p. 5677-5707, 2025. DOI: 10.1002/suco.202400556.
- [4] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de inspeção de pontes rodoviárias. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2004. (Publicação IPR-709).
- [5] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Norma DNIT 010/2024-PRO: inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido — procedimento. Brasília: DNIT, 2024.
- [6] DI CARLO, F.; MEDA, A.; MOLAIONI, F.; RINALDI, Z. Experimental evaluation of the corrosion influence on the structural response of Gerber half-joints. *Engineering Structures*, v. 285, art. 116052, 2023. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116052.
- [7] ENTEZAMI, Alireza; SARMADI, Hassan; DE MICHELE, Carlo. Probabilistic damage localization by empirical data analysis and symmetric information measure. *Measurement*, v. 198, p. 111359, 2022.
- [8] LANGENDOCK, T. V. Lajes contínuas de pontes – NB2-1961: cálculo na fase plástica. Notas de aula. Organização: Eduardo C.S. Thomaz. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia (IME), s.d.
- [9] LI, P. F.; WANG, Y. F.; LIU, B. D.; SU, L. Damping properties of highway bridges in China. *Journal of Bridge Engineering*, v. 19, n. 5, art. 04014005, 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000578.
- [10] MASSARELLI, E.; CIVERA, M.; MARA, S.; RAIMONDI, M.; GIORDANO, P. F.; QUQA, S.; AIMAR, M.; LIMONGELLI, M. P.; CHIAIA, B. Crowdsensing-based automated operational modal analysis for indirect bridge structural health monitoring. *Engineering Structures*, v. 353, art. 122203, 2026. DOI: 10.1016/j.engstruct.2026.122203.
- [11] MCSWEENEY, N.; GHIASI, R.; MALEKJAFARIAN, A.; OZER, E. Extracting bridge modal frequencies using stationary versus drive-by modes of smartphone measurements. *Infrastructures*, v. 9, n. 12, art. 218, 2024. DOI: 10.3390/infrastructures9120218.
- [12] ORACZEWSKI, Tomasz; STASZEWSKI, Wiesław J.; UHL, Tadeusz. Nonlinear acoustics for structural health monitoring using mobile, wireless and smartphone-based transducer platform. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 27, n. 6, p. 786-796, 2016.
- [13] OZER, E.; KROMANIS, R. Smartphone prospects in bridge structural health monitoring, a literature review. *Sensors*, v. 24, n. 11, art. 3287, 2024. DOI: 10.3390/s24113287.
- [14] PANIGATI, T.; ZINI, M.; STRICCOLI, D.; GIORDANO, P. F.; TONELLI, D.; LIMONGELLI, M. P.; ZONTA, D. Drone-based bridge inspections: current practices and future directions. *Automation in Construction*, v. 173, art. 106101, 2025. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106101.
- [15] SANTARSIERO, G.; PICCIANO, V.; MASI, A. Structural rehabilitation of half-joints in RC bridges: a state-of-the-art review. *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 21, n. 2, p. 227-250, 2025. DOI: 10.1080/15732479.2023.2200759.
- [16] SARMANDI, H.; ENTEZAMI, A.; YUEN, K. V.; BEHKAMAL, B. Review on smartphone sensing technology for structural health monitoring. *Measurement*, v. 223, p. 113716, 2023. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113716.
- [17] STAACKS, S.; HÜTZ, S.; HEINKE, H.; STAMPFER, C. Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. *Physics Education*, v. 53, n. 4, art. 045009, 2018. DOI: 10.1088/1361-6552/aac05e.
- [18] SUN, X.; ILANKO, S.; MOCHIDA, Y.; TIGHE, R. C. A review on vibration-based damage detection methods for civil structures. *Vibration*, v. 6, n. 4, p. 843-875, 2023. DOI: 10.3390/vibration6040051.
- [19] SVENDSEN, B. T.; PETERSEN, Ø. W.; FRØSETH, G. T.; RØNNQUIST, A. Improved finite element model updating of a full-scale steel bridge using sensitivity analysis. *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 19, n. 3, p. 315-331, 2023. DOI: 10.1080/15732479.2021.1944227.