



Análise Dinâmica de um Viaduto para Caminhões Fora de Estrada: Avaliação Estrutural e Recomendações para Preservação

Francisco Luiz Campos Lopes¹, Laura Viana de Melo², Leonardo Braga Passos³, Rodrigo Carvalho Santos⁴, Ana Beatriz Miranda Nunes⁵

^{1,4,5} PI Engenharia / Diagnóstica / diagnostica@piengenharia.com.br

² PI Engenharia / Laboratório / laboratorio@piengenharia.com.br

³ PI Engenharia / Consultoria / pi@piengenharia.com.br

Resumo

A análise do comportamento estrutural é fundamental para garantir a segurança e a funcionalidade das construções, especialmente em estruturas sujeitas a variações de carregamento ao longo do tempo. Este artigo apresenta a avaliação de um viaduto projetado para a passagem de caminhões fora de estrada que sofrera com mudanças nas solicitações de carga decorrentes das adaptações operacionais da fábrica. Para investigar o desempenho da estrutura, foram realizados ensaios de análise de vibrações utilizando acelerômetros e um sistema de aquisição de dados. A metodologia adotada permitiu identificar as frequências naturais do viaduto, avaliar seus modos de vibração e determinar os efeitos dinâmicos gerados pela passagem dos veículos. Além disso, a resposta da estrutura foi comparada a parâmetros normativos, possibilitando uma avaliação qualitativa de seu comportamento frente às novas condições de carregamento. Os resultados indicaram que determinadas velocidades dos caminhões amplificavam a resposta dinâmica da estrutura, aumentando o risco de danos progressivos. Com base na análise, foram estabelecidas recomendações para a limitação do tráfego e da velocidade dos veículos, a fim de prevenir falhas e prolongar sua vida útil. A abordagem adotada demonstra a importância da análise dinâmica na preservação da integridade estrutural de viadutos e ressalta a necessidade de monitoramento periódico para mitigar os impactos das alterações operacionais sobre a infraestrutura existente.

Palavras-chave

Análise dinâmica estrutural; Monitoramento estrutural; Ensaios não destrutivos; OAE industrial.

Introdução

O monitoramento estrutural, seja em tempo real ou em intervalos periódicos, é essencial para a avaliação do desempenho de obras civis submetidas às ações solicitantes. Estruturas como pontes, viadutos e passarelas estão frequentemente sujeitas a sobrecargas e velocidades superiores aos limites normativos, que, embora consideradas em projeto, não contemplam os efeitos progressivos de manifestações patológicas ao longo da vida útil. Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013), estruturas de concreto armado devem apresentar uma durabilidade mínima de 50 anos sem comprometimento estrutural significativo, como fenômenos de corrosão avançada e fissuração crítica.

No entanto, Gjorv (2000) aponta que, nos Estados Unidos, os custos associados à recuperação de pontes em processo de corrosão na década de 1980 superaram US\$ 24 bilhões. A degradação precoce das estruturas de concreto armado pode gerar impactos financeiros expressivos, correspondendo a aproximadamente 5% do PIB em países industrializados (IPEN, 2002; Dotto, 2006; Ribeiro, 2014). Além disso, os impactos de uma estrutura com baixa durabilidade vão além do financeiro, mas englobam também questões sociais e ambientais (NEVILE, 2016).

Dentre os métodos de avaliação da integridade estrutural, destaca-se o ensaio de prova de carga dinâmica, normatizado pela NBR 15307 (ABNT, 2006), que permite a análise da frequência modal, dos índices de vibração e dos deslocamentos estruturais. A utilização de acelerômetros acoplados a sistemas de aquisição de dados possibilita o monitoramento em tempo real, tanto em condições de carregamento espontâneo (sem

controle de fluxo e carga) quanto em carregamentos controlados, permitindo a definição de diferentes estágios de carregamento. A análise acelerométrica viabiliza a determinação da frequência natural da estrutura e do índice de vibração, parâmetros fundamentais para a caracterização do comportamento dinâmico do sistema estrutural.

A vibração estrutural é um fenômeno físico caracterizado pela oscilação de um sistema em torno de seu ponto de equilíbrio. Essa oscilação pode ser descrita por três grandezas fundamentais: amplitude, correspondente ao deslocamento máximo em relação à posição de equilíbrio; frequência, expressa em Hertz (Hz), que define o número de ciclos completos por unidade de tempo; e fase, que representa a posição relativa da oscilação dentro de um ciclo. A resposta vibratória pode se manifestar sob diferentes regimes, como vibração livre (ausência de forças externas), vibração forçada (presença de excitação periódica) e vibração amortecida (perda gradual de energia por dissipação).

A NBR 6118 (ABNT, 2024) estabelece critérios empíricos para a determinação da frequência natural de uma estrutura e diretrizes qualitativas para a avaliação dos índices de vibração. Além disso, a determinação do deslocamento relativo pode ser realizada por meio da integração dupla dos sinais acelerométricos, permitindo a análise modal detalhada do sistema estrutural.

O presente estudo teve como objetivo analisar a frequência natural, os índices de vibração e os modos de vibração de uma ponte industrial em estrutura mista, que sofreu alterações nas condições de carregamento e aumento da velocidade de tráfego. A investigação permitiu a definição de novos limites operacionais que garantem a segurança e a integridade estrutural, contribuindo para a manutenção e a durabilidade da infraestrutura.

Da estrutura em análise

A ponte analisada neste estudo é uma obra de arte especial (OAE) industrial, com oito anos de idade, destinada ao tráfego de caminhões fora de estrada carregados de minério e ônibus para transporte de colaboradores. A estrutura possui um vão livre de aproximadamente 30 metros e uma superestrutura mista, composta por pré-laje e laje em concreto armado, além de elementos metálicos, como longarinas e transversinas, conforme ilustrado na Figura 1.



Figura 1 – Vista do tabuleiro e das transversinas da ponte.

Da instalação dos acelerômetros e definição dos estágios de carregamento

Foram instalados quatro acelerômetros triaxiais para a aquisição dos dados vibratórios da estrutura. Três sensores foram posicionados na face superior da mesa, sendo dois localizados no meio do vão das longarinas e um a um quarto do vão da longarina, conforme ilustrado na Figura 2. O quarto acelerômetro foi fixado na face inferior da pré-laje do tabuleiro, na extremidade do balanço. Para garantir alta precisão nas medições, foram utilizados acelerômetros de baixo ruído modelo SNS-ABS05-X2-Y2-Z2.



Figura 2 – Instalação dos acelerômetros nos pontos de análise

Para a verificação da frequência modal e do comportamento vibratório da ponte, foram estabelecidos diferentes estágios de carregamento, o que permite a análise das vibrações tanto no estado natural quanto sob condições operacionais. O objetivo foi avaliar se as respostas dinâmicas da estrutura permanecem dentro dos padrões normativos vigentes. Além dos estágios predefinidos, também foi realizado um monitoramento com a liberação do tráfego de ônibus de transporte de funcionários, sem controle de carregamento ou velocidade.

As velocidades adotadas para a análise dinâmica foram definidas considerando a velocidade real do tráfego local (cerca de 40 km/h). No entanto, como a velocidade permitida pela contratante é de 25 km/h, essa condição também foi simulada para a passagem de um caminhão carregado. No total, foram analisados 71 estágios de carregamento, abrangendo diferentes condições dinâmicas, como frenagens, tráfego simultâneo em sentidos opostos e no mesmo sentido, variações de carga e velocidade, entre outros cenários.

Os ensaios foram realizados com caminhões de 20 toneladas transportando cargas de aproximadamente 40 toneladas. No total, foram analisados 852 espectros de aceleração (71 estágios \times 4 acelerômetros \times 3 eixos), totalizando cerca de 5 horas de ensaios. Para facilitar a interpretação dos dados, os resultados foram organizados em 11 grupos de análise, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 -Estágios de carregamento durante o ensaio

Delta de horário		Estágio	Descrição do estágio
00:00:00	00:47:00	FL Almoço	Fluxo livre de operação durante o horário de almoço
00:47:00	00:57:00	SF	Sem fluxo por 10min
01:01:05	01:13:24	Pessoa	Movimentações de 1 pessoa
01:13:24	01:52:00	Carros	Movimentações de 1 carro (40 km/h)
01:52:00	03:25:27	1 caminhão	Movimentações de 1 caminhão carregado (40 km/h)
03:25:27	03:33:20	Lado a Lado	Movimentações de 2 caminhões lado a lado (40 km/h)
03:33:20	03:55:45	Comboio 1	Movimentações de 2 caminhões em comboio (40 km/h)
03:55:45	04:42:00	FL saída	Fluxo livre de operação durante o horário de saída
04:42:00	04:51:00	Comboio 2	Movimentações de 2 caminhões em comboio (40 km/h)
04:51:00	04:58:00	Cruzado	Cruzamento de 2 caminhões: sentidos opostos (40 km/h)
04:58:00	05:06:35	1 caminhão 25km/h	Movimentações de 1 caminhão carregado (25 km/h)

Do tratamento dos dados de acelerometria

Para o tratamento dos espectros de acelerometria, foi utilizado o software "PI_ACL", desenvolvido em Python pela PI Engenharia (Figura 3). O processamento dos dados incluiu: correção do eixo, eliminando platôs causados por ruídos; filtragem do espectro na banda de passagem mais adequada, considerando a frequência natural identificada em cada estágio; cálculo do espectro de frequência por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT); e determinação do índice de vibração, conforme as recomendações da NBR 15307 (ABNT, 2016). Além disso, o cálculo dos deslocamentos relativos foi realizado por meio da integração dupla dos espectros de acelerometria, metodologia embasada em Hester et al. (2017) e Arraigada & Partl (2006).

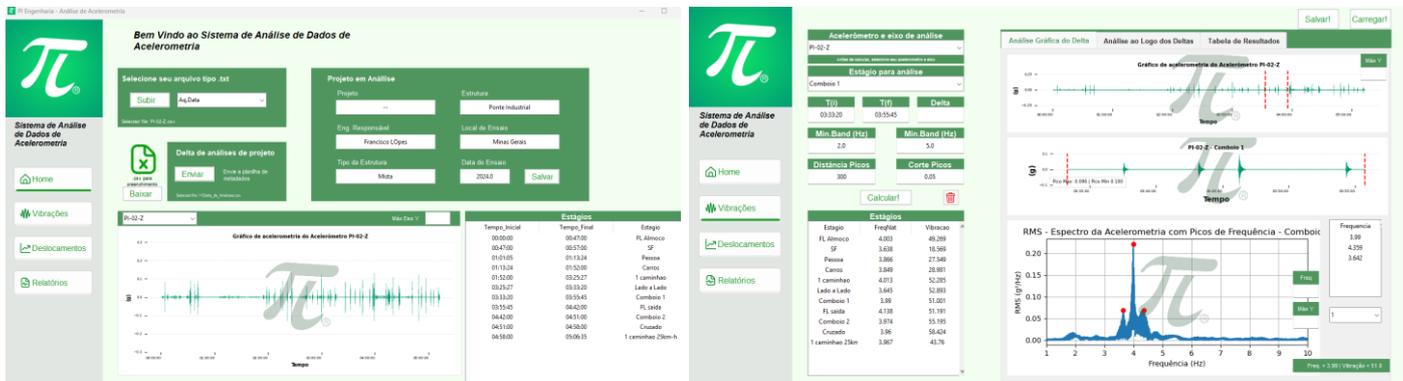


Figura 3 – Captura de tela do Software “PI_ACL”

Após a remoção dos ruídos e a correção do eixo dos dados espectrais, procede-se à análise da amplitude e da frequência natural da estrutura dentro de um determinado intervalo de tempo (Figura 4), conforme definido para cada estágio de carregamento. Essa abordagem permite a identificação precisa dos modos de vibração e das características dinâmicas da ponte, fornecendo subsídios para a avaliação de seu desempenho estrutural.

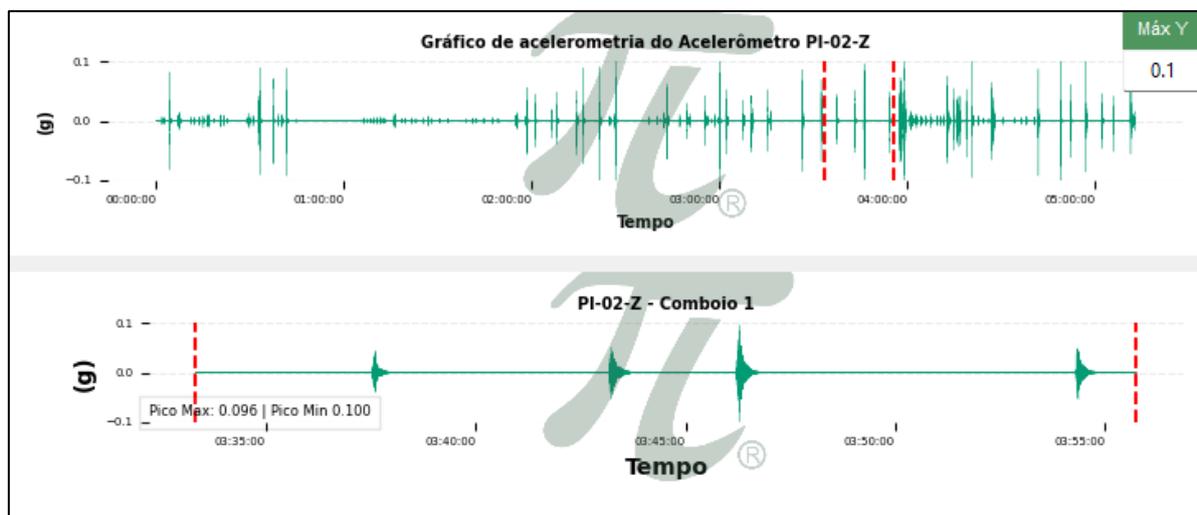


Figura 4 – Análise do delta do espectro de acelerometria

A partir do delta do espectro, aplica-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT), permitindo a identificação das frequências naturais e dos modos de vibração da estrutura. A FFT converte o sinal de acelerometria do domínio do tempo para o domínio da frequência, possibilitando a detecção das componentes espectrais associadas às respostas dinâmicas da estrutura (Figura 5). Esse procedimento é fundamental para a caracterização do comportamento vibratório, auxiliando na avaliação da integridade estrutural e no monitoramento de variações ao longo do tempo.

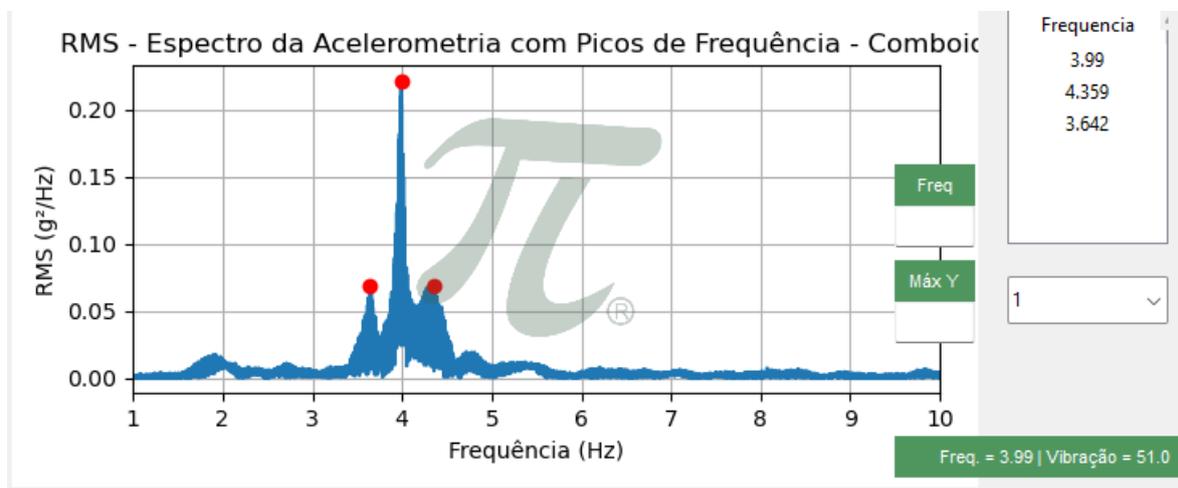


Figura 5 – Análise da frequência natural da estrutura

Na análise modal, o valor quadrático médio (RMS) é utilizado para quantificar a intensidade das vibrações da estrutura, auxiliando na identificação de danos ou comportamentos anômalos. A frequência natural da estrutura é definida como aquela que apresenta o maior índice RMS.

De acordo com o Eurocode EN 1991-2 (2003), para uma ponte com vão de 30 metros, a frequência natural deve estar entre 3,05 Hz e 7,16 Hz.

O índice de vibração de uma estrutura é determinado conforme a NBR 15307 (ABNT, 2016), utilizando a amplitude máxima da acelerometria (A , em g) e a frequência natural (f , em Hz) do estágio analisado. A Equação 1 apresenta o cálculo desse índice, sendo um parâmetro essencial para a avaliação do desempenho dinâmico da estrutura.

$$V = 10 \log(160 \pi^4 A^2 f^3) \quad (1)$$

A NBR 15307 (ABNT, 2016) estabelece parâmetros qualitativos para o índice de vibração de uma estrutura, correlacionando-o a diferentes graus de dano, conforme apresentado na Tabela 2. A norma define que um índice de vibração entre 50 e 60 indica um nível de dano associado ao “colapso” da estrutura. No entanto, a terminologia empregada sugere uma falha iminente, o que nem sempre é observado empiricamente. Dessa forma, interpreta-se que essa faixa de valores representa um indicador de risco elevado, apontando a possibilidade de colapso, e não necessariamente uma falha estrutural imediata.

Tabela 2 – Nível de dano considerando o índice de vibração (ABNT NBR 15307, 2016)

Vibração (V)	Nível de danos
10 – 30	Nenhum dano
30 – 40	Danos leves
40 – 50	Danos severos
50 – 60	Colapso

A estimativa do deslocamento a partir de dados de acelerometria é realizada por meio de integração numérica sucessiva da aceleração, conforme apresentado na Equação 2. Inicialmente, a aceleração (a) medida é integrada em função do tempo (t) para obter a velocidade. Em seguida, a velocidade é novamente integrada para determinar o deslocamento. Esse procedimento permite a análise do comportamento dinâmico da estrutura, sendo essencial para a avaliação de deslocamentos relativos e possíveis deformações sob diferentes condições de carregamento.

$$x(t) = \iint a(t) dt^2 \quad (2)$$

Da análise dos estágios de carregamento

Com o intuito de fornecer uma análise representativa de um dos eixos dos acelerômetros, optou-se por apresentar, neste artigo, os dados do eixo Z do acelerômetro 02, localizado no meio do vão da ponte, que se mostrou o ponto mais afetado durante os estágios de carregamento.

Durante a análise da frequência modal nos diferentes estágios de carregamento, observou-se um intervalo de frequências naturais variando de 3,63 Hz a 4,13 Hz. Portanto, está dentro da faixa estabelecida pelo Eurocode EN 1991-2 (2003). A Figura 6 apresenta a análise da frequência natural para os respectivos estágios de carregamento realizados.

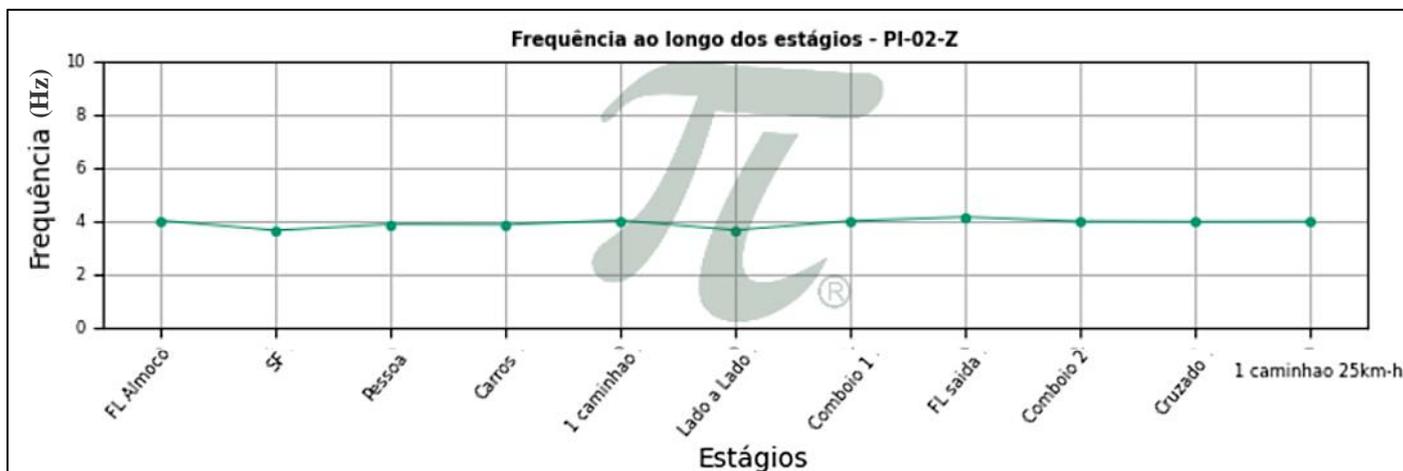


Figura 6 – Análise da frequência natural da estrutura

A análise da vibração da estrutura, com base no movimento do eixo Z no ponto 02, está apresentada na Figura 7. Observa-se que o trânsito de carros a 40 km/h não gera nenhum tipo de dano significativo à estrutura. No entanto, as passagens de ônibus durante fluxos livres e de caminhões carregados, ambos a 40 km/h, resultam em vibrações que indicam a "possibilidade de colapso" da estrutura.

Especificamente, as passagens de caminhões de forma cruzada geraram índices de vibração próximos ao limite da classe de "possibilidade de colapso", com um índice atingindo 58,4. A passagem de um caminhão a 40 km/h resultou em um índice de vibração de 52,2, o que também sugere danos que se enquadram na "possibilidade de colapso". Por outro lado, a passagem de um caminhão a 25 km/h refletiu um índice de vibração de 43,7, situando-se na classe de "danos severos" à estrutura.

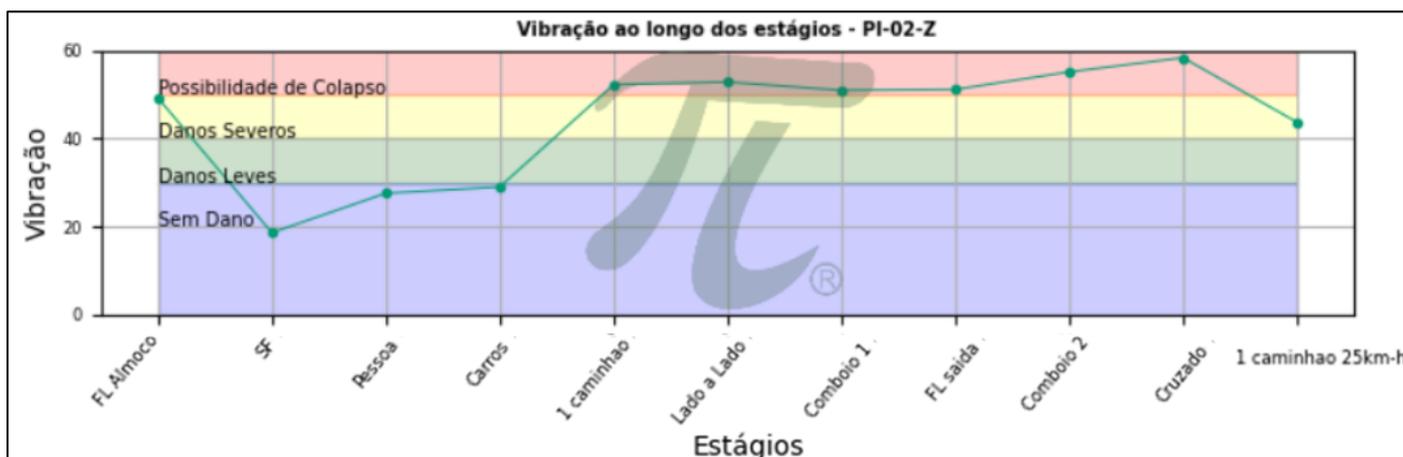


Figura 7 – Análise do índice de vibração da estrutura

A análise das vibrações indica que a velocidade de rodagem dos veículos carregados é um fator agravante para as vibrações da estrutura, resultando em uma classificação de "dano" maior à ponte. Essa análise permite uma avaliação crítica das regulamentações de tráfego, sugerindo que uma velocidade de trânsito menor poderia minimizar os danos à estrutura, contribuindo para uma maior integridade estrutural e prolongamento da vida útil da ponte.

Da análise da movimentação da estrutura

A movimentação da ponte foi realizada de forma qualitativa, com o objetivo de compreender como uma determinada frequência natural influenciava o comportamento dinâmico da estrutura. A análise não buscou quantificar a movimentação exata, mas sim observar os padrões de vibração e como as diferentes frequências naturais interagem com a ponte sob as condições de carregamento impostas.

A análise da movimentação da estrutura foi realizada em relação ao eixo Z. Para isso, foram definidos pontos de movimentação "virtuais", ou seja, a partir dos pontos de instalação dos acelerômetros, foi feita a estimativa da movimentação de pontos adicionais, não diretamente instrumentados. Para a descrição desses pontos

virtuais, foram determinados os possíveis modais de movimentação da ponte. A Figura 8 apresenta a análise desses modais de movimentação, fornecendo uma visão detalhada do comportamento dinâmico da estrutura sob diferentes condições de carregamento.

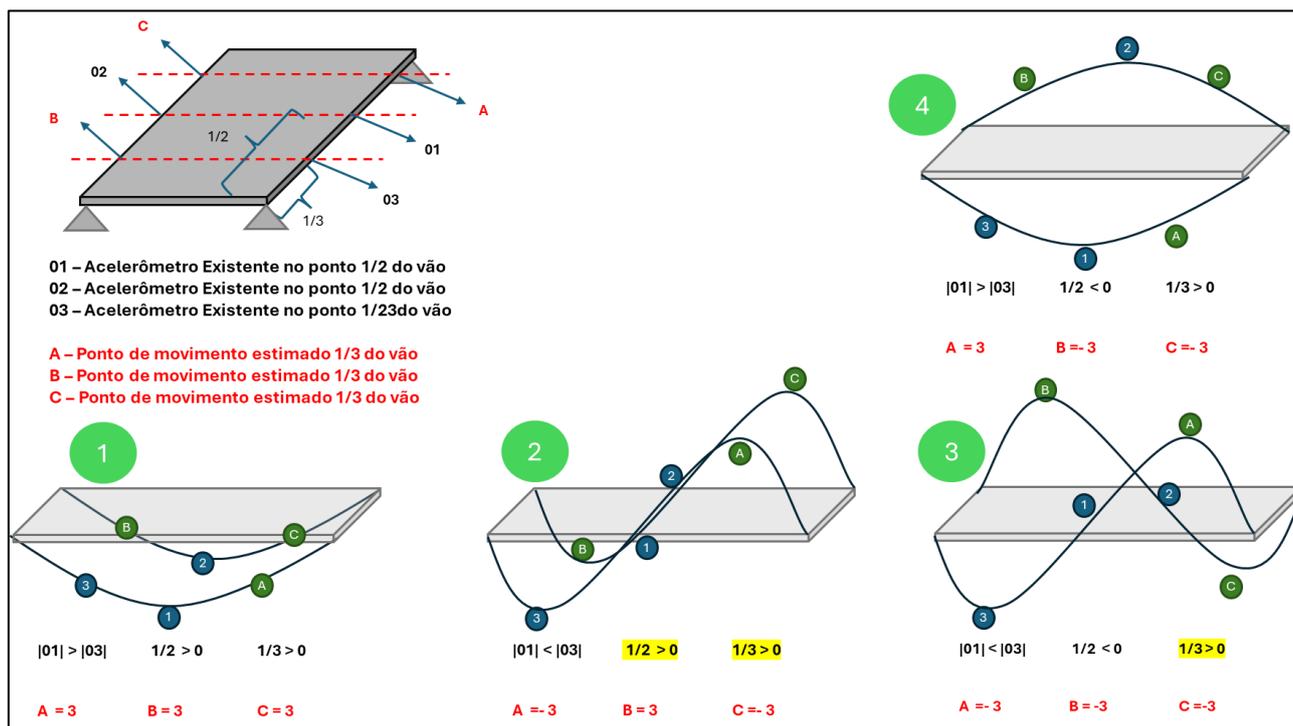


Figura 8 – Análise dos modais de movimentação da ponte

Com base nas condições de movimentação dos acelerômetros, tanto os instalados (pontos vermelhos) quanto os virtuais (pontos azuis), foi elaborada a simulação da movimentação da estrutura da ponte durante o ensaio. A Figura 9 apresenta a movimentação da estrutura da ponte em relação ao eixo Z. Observa-se que a ponte realiza movimentações do tipo 2 e tipo 3, conforme indicadas na Figura 8, o que reflete os diferentes padrões de comportamento dinâmico da estrutura sob os estágios de carregamento analisados.

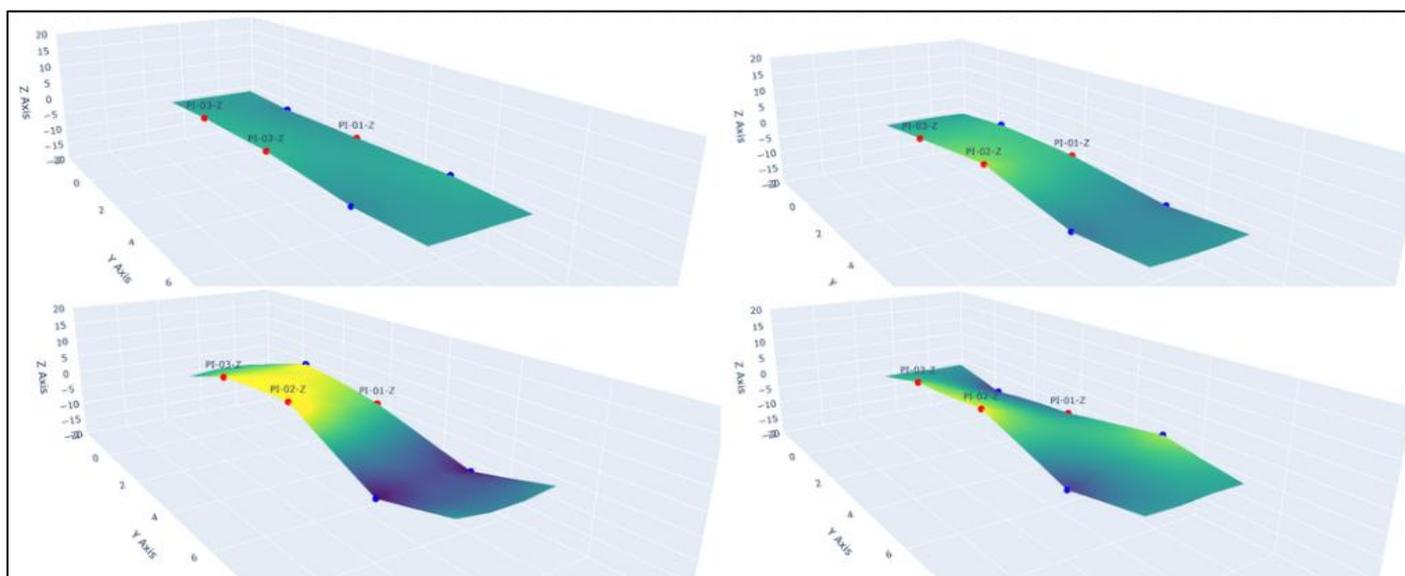


Figura 9 – Movimentações observadas na ponte

Conclusões

A análise realizada neste estudo permitiu uma compreensão detalhada da dinâmica estrutural da ponte, abordando desde a identificação dos modais de vibração até a avaliação do impacto das velocidades de rodagem dos veículos sobre a integridade da estrutura. O uso de acelerometria e simulação de modais forneceu uma ferramenta para analisar como diferentes frequências naturais influenciam os modos de movimentação da ponte. Em particular, foi possível identificar de forma clara as velocidades de trânsito ideais para minimizar os danos à estrutura, destacando que a passagem de caminhões carregados a altas velocidades gerava vibrações significativas que indicam um risco de colapso iminente.

Esse resultado é crucial para o desenvolvimento de estratégias de monitoramento e gestão do tráfego, pois permite que os engenheiros responsáveis pela manutenção da ponte determinem limites de velocidade mais adequados para proteger a estrutura. Além disso, ao identificar as áreas mais solicitadas pela dinâmica de carregamento e as frequências de vibração que mais afetam a ponte, a análise facilita o planejamento de reforços estruturais nas regiões mais críticas, garantindo que as intervenções sejam direcionadas e eficazes. Assim, a equipe de engenharia estrutural pode tomar decisões mais assertivas, especificando melhorias e reforços que atendam às necessidades específicas da estrutura, maximizando sua vida útil e segurança.

Além disso, a análise possibilitou um entendimento mais completo sobre como as vibrações dinâmicas podem ser utilizadas como indicadores de saúde estrutural, pois permite a detecção precoce de problemas antes que se tornem críticos. A combinação de simulações e dados de acelerometria provou ser uma abordagem robusta, proporcionando uma avaliação abrangente e precisa das condições de operação da ponte e oferecendo subsídios para a manutenção preventiva. Em resumo, este estudo não só contribuiu para a compreensão dos efeitos das condições de tráfego nas infraestruturas críticas, como também ofereceu um caminho para a otimização do desempenho estrutural por meio da gestão adequada das cargas e da identificação de pontos de reforços necessários.

Referências

- ARRAIGADA, M.; PARTL, M. Calculation of displacements of measured accelerations, analysis of two accelerometers and application in road engineering. 6th Swiss Transport Research Conference, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15307:2006 - Ensaio não destrutivo – Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118:2024 – Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2024.
- DOTTO, J. M. R. Corrosão do aço induzida por íons cloreto – Uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto com ou sem pozolana. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2006.
- EUROPEAN UNION. EN 1991-2 (2003) (English): Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu>. Acesso em: 12 mar. 2025.
- GJØRV, O.E. Controlled service life of concrete structures and environmental consciousness. Proceedings, International Workshop on Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century, editado por O.E. Gjorv e K. Sakai, E & FN Spon, Londres e Nova Iorque, p. 1-13, 2000.
- HESTER, David; BROWNJOHN, James; BOCIAN, Mateusz; XU, Yan. Low cost bridge load test: Calculating bridge displacement from acceleration for load assessment calculations. *Engineering Structures*, v. 143, p. 358-374, 2017. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.04.021.
- INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES (IPEN). Área de materiais desenvolve estudos contra a corrosão. Notícias - Jornal Órbita. Jul. 2002. Disponível em: <http://www.ipen.br/sitio?idc=896>.
- RIBEIRO, Daniel Verás. Corrosão em Estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.