

AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE DE UMA PONTE DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Evaluation of the resistant capacity of a concrete bridge using nondestructive tests

Keyla Junko Chaves Shinohara (1); Emmanuelle Stefânia Holdefer Garcia (1); Matheus Silva Gonçalves (1); Paulo Junges (1); Roberto Caldas Pinto (1); Amir Mattar Valente (1)
(1) *Laboratório de Transportes e Logística (LabTrans), Universidade Federal de Santa Catarina.*

Resumo

A crescente capacidade de carga dos veículos pesados tem despertado mundialmente a necessidade do monitoramento da segurança nas estruturas de concreto que compõem a infraestrutura rodoviária. O excesso de aplicação de cargas pelos veículos causa deterioração da estrutura e, conseqüentemente, redução da vida útil de fadiga dos componentes, fazendo-se necessário avaliar assim, a capacidade resistente máxima estrutural. Os ensaios não destrutivos surgem como estratégia de monitoramento sem retirada de corpos de prova da estrutura, aliada à eficácia e rapidez perante os ensaios intrusivos. Os sensores de deformação, *strain gauges*, destacam-se por avaliarem o estado de conservação das estruturas, capacidade resistente e, ainda, o monitoramento do tráfego incidente. Neste artigo, os *strain gauges* foram instalados e ligados a um sistema de aquisição de dados em uma ponte de concreto armado e monitorados durante 42 dias. A verificação dos esforços acidentais gerados pelo tráfego na estrutura foi realizada pelo sistema de pesagem em movimento em pontes, *Bridge Weigh-In-Motion* (B-WIM). Após a calibração do sistema, foram obtidas linhas de influência real para a ponte e estas analisadas em conjunto com as linhas teóricas geradas através de cálculos normatizados. Por vezes, os esforços gerados por dado carregamento atingiram valores teóricos cerca de 40% superiores aos obtidos pelo comportamento real da estrutura pelo B-WIM. Por este ponto de vista, certas previsões podem estar superestimadas, resultando em conclusões conservadoras e distorcidas sobre a capacidade resistente e condição de segurança da estrutura. Como conclusão, evidencia-se a necessidade de monitoramento de pontes uma vez que ao se avaliar o comportamento real da estrutura, a tomada de decisões dá-se com melhor embasamento, garantindo a segurança dos veículos e seus passageiros ao mesmo tempo em que não se impõe restrições desnecessárias ao tráfego dos veículos.

Palavras-Chave: ponte de concreto, ensaios não destrutivos, strain gauges, capacidade resistente.

Abstract

The growing load capacity of vehicles has aroused the need for safety monitoring in the concrete structures that make up the road infrastructure worldwide. Excessive application of loads by the vehicles causes deterioration of the structure and, consequently, reduction of the fatigue life of the components, making it necessary to evaluate, thus, the maximum structural resistant capacity. Nondestructive tests show as a monitoring strategy without removing specimens from the structure, combined with efficiency and speed compared with intrusive tests. Strain gauges sensors, stand out for evaluating the state of conservation of structures, resistant capacity, and, even, the monitoring of incident traffic. In this article, strain gauges were installed and connected to a data acquisition system on a concrete bridge and monitored for 42 days. The verification of accidental efforts generated by the traffic in the structure was carried out by the Bridge Weigh-In-Motion (B-WIM) system. After calibrating the system, real lines of influence were obtained for the bridge and these were analyzed together with the theoretical lines generated through standardized calculations. Sometimes, the efforts generated by the data reached reach theoretical values approximately 40% higher than the real performance of the structure by B-WIM. From this point of view, certain options may be overestimated, resulting in conservative and distorted conclusions about the structure's resilient capacity and safety condition. As a conclusion, was shown as necessary to monitor bridges once and when assessing the real behavior of the structure, decision making allows for the best foundation, the safety of vehicles and passengers while not imposing unnecessary restrictions on traffic.

Keywords: concrete bridge, non-destructive tests, strain gauges, resistant capacity.

1 Introdução

Motivados pela busca de valores otimizados de segurança e capacidade estrutural, as pontes de concreto armado tem sido objeto de diversos estudos. Segundo FERREIRA (2006), a avaliação da capacidade resistente vem sendo priorizada pela necessidade dos órgãos responsáveis mapearem os eventuais danos gerados nas estruturas pelas crescentes cargas impostas pelos veículos. A oscilação gerada pelo regime de aplicação de cargas móveis induz maior deterioração do pavimento e consequentemente reduzem a vida útil de fadiga dos diversos componentes estruturais rodoviários, podendo, por vezes, ocasionar o colapso de pontes e viadutos (DENG et al, 2016).

De forma a priorizar os investimentos de recuperação e manutenção tem-se a determinação de critérios eficientes e confiáveis quanto a determinação da capacidade resistente máxima estrutural e avaliação da segurança das estruturas e conforto para os usuários (MASCARENHAS et al, 2019). O uso de ensaios não destrutivos (END) surge como uma estratégia de monitoramento viável sem o comprometimento da estrutura com maior eficácia e rapidez quando comparado à ensaios convencionais. Dentre os diversos tipos de END o uso de sensores, como os *strain gauges*, destacam-se como uma forma de investigação do estado de conservação das estruturas de concreto no que diz respeito à deterioração e avaliação da capacidade resistente. A avaliação da capacidade resistente de pontes de concreto por meio de END dá-se a partir da ação introduzida pelo tráfego atuante na estrutura, além do uso de códigos, como por exemplo, ISO 2394 e ISO/CD 13822 (ŽNIDARI et al., 2016).

O Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) é responsável, no Brasil, pela determinação dos limites máximos de peso bruto total (PBT) nos veículos de carga, e a crescente alteração da topologia da frota faz com que os esforços solicitantes sobre os sistemas estruturais devam ser monitorados (FERREIRA, 2006). O uso de sistemas END possibilitam que este monitoramento seja realizado de maneira precisa, com o propósito de verificar se a estrutura está apta a resistir aos níveis de carregamento para os quais ela foi projetada e está submetida.

De modo a obter a segurança atrelada à capacidade resistente de pontes de concreto e uma metodologia utilizando END, neste trabalho *strain gauges* (sensores de deformação) foram instalados e ligados a um sistema de aquisição de dados em uma ponte de concreto. O sistema de monitoramento foi realizado durante o período de 42 dias. O objetivo partiu da identificação do nível de resistência das estruturas na tomada de decisão sobre o dispêndio de recursos em ações de intervenção, como de manutenção e recuperação. Paralelamente, foi realizada a verificação dos esforços acidentais gerados pelo tráfego na estrutura, por meio de um sistema de monitoramento de pesagem em movimento em pontes, *Bridge Weigh-In-Motion* (B-WIM).

2 Ensaios não destrutivos atribuídos à tecnologia B WIM

Além das novas composições de eixos, os veículos, por vezes, trafegam com excesso de carga, refletindo em um maior peso bruto total (PBT), aplicando sobre as estruturas cargas excedentes às dimensionadas. Como forma de avaliar de forma conjunta o comportamento estrutural de pontes e viadutos e a carga imposta pelas cargas incidentes, utilizam-se os

ensaios não destrutivos (END). Este tipo de ensaio, tem como objetivo a não danificação da estrutura ou a exigência de pequenos reparos na camada superficial após os ensaios, ou seja, sem nenhuma alteração significativa no elemento (MILANEZ, 2017). O uso de END permite também que estes sejam realizados em locais abertos, diretamente sob a estrutura avaliada. Desta forma, os fatores externos, como variações climáticas, ventos e quaisquer adversidades, devem ser consideradas juntamente às análises (LORENZI et al., 2016).

2.1 Definição da tecnologia B-WIM

O *Bridge Weigh-In-Motion* (B-WIM) é um sistema especial de pesagem dinâmica na qual os *strain gauges* são posicionados nas vigas e longarinas da estrutura e conectados a um aquisitor de dados. Estes sensores, utilizados para o END, são fixos com o uso de *parabóls*, a profundidade de perfuração estabelecida foi de 2 cm, não atingindo dimensões superiores ao cobrimento do concreto e, assim, não proporcionando danos estruturais. Para análise através do B-WIM foram utilizados *strain gauges* com 76 mm de comprimento, envoltos em uma capa de alumínio com dimensões de 11,1 x 3,2 x 1,3 cm e com as seguintes especificações:

- ☐ Resistência de 350 Ω .
- ☐ Circuito com ponte de *Wheatstone* com quatro sensores ativos de 350 Ω .
- ☐ Faixa de deformação de $\pm 4000\mu\epsilon$ (calibrado para $\pm 2000\mu\epsilon$).
- ☐ Acurácia $< \pm 2\%$.
- ☐ Temperatura de operação entre -50°C e $+85^{\circ}\text{C}$.
- ☐ Material de alumínio.

2.2 Aplicação da tecnologia B-WIM em estruturas de concreto armado

O sistema B-WIM, além de fornecer dados de peso e classificação dos veículos, fornece informações adicionais que podem auxiliar na avaliação estrutural de pontes e viadutos (SHINOHARA et al, 2019). O uso de sistemas B-WIM em pontes de concreto armado é realizado a partir de três etapas:

- ☐ Obtenção da linha de influência real da ponte.
- ☐ Caracterização do tráfego atuante sobre a ponte.
- ☐ Estimativa de esforços acidentais máximos.

Para efeitos de avaliação da capacidade resistente de pontes por meio do B-WIM, são utilizadas as Linhas de Influência (LIs) reais para obtenção dos esforços provenientes do tráfego. A diferença obtida por linhas de influência reais e teóricas podem ser observadas na Figura 1 onde, a linha azul corresponde a LI teórica (calculada através de normas) e a LI vermelha à real (calculada através da instrumentação).

Através da Figura 1 é possível observar a suavização da curvatura da LI real e de seus picos, em comparação com os cálculos teóricos. Como explicação tem-se, por exemplo, que as condições de vinculação na estrutura divergem daquelas que haviam sido idealizadas na fase de projeto. Por exemplo, podem existir apoios elásticos nos extremos dos balanços ou a vinculação nos apoios pode não ser uma rótula perfeita.

Ensaios não destrutivos como o B-WIM também são capazes de realizar o monitoramento do tráfego atuante na estrutura, uma vez que os *strain gauges* detectam as mínimas solicitações sofridas pela estrutura.

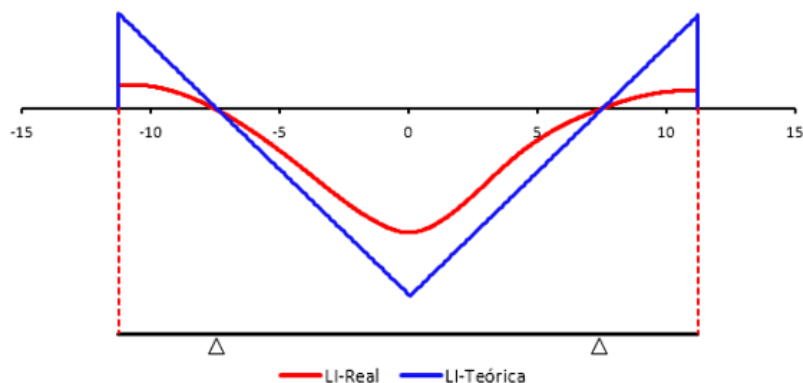


Figura 1 - Comparação entre linha de influência (LI) real e teórica para momentos fletores

A partir destas informações e do uso da LI teórica de uma ponte, por exemplo, alterações nos valores de PBT podem alcançar 40%. Essas diferenças dizem respeito à minimização de cargas incidentes e consequentes prejuízos à avaliação da segurança. O uso da LI real das pontes torna-se de importância fundamental quanto à determinação da capacidade resistente e também como forma de obter informações sobre o tráfego atuante na estrutura, que podem ser apresentados como histogramas de esforços com os momentos fletores gerados, como apresentado pela Figura 2.

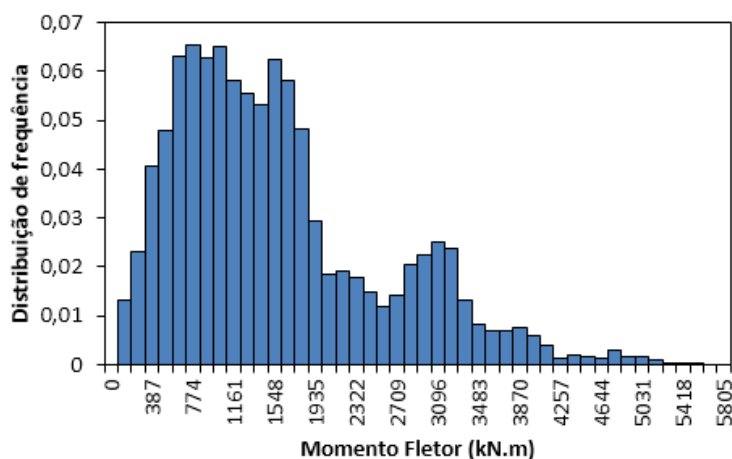


Figura 2 - Exemplo de histograma de momentos fletores a partir de dados dos *strain gauges*

Os momentos obtidos pelos histogramas são utilizados para simular os efeitos máximos das cargas esperadas nas pontes. Para fins de extrapolação de valores em função dos dados ou para ajustar a causa de distribuições de efeitos de carga, podem ser utilizadas distribuições estatísticas como Gumbel, Fréchet, Weibull ou mesmo Normal (JUNGES, 2017). As cargas acidentais, de modo geral, são definidas nas normas brasileiras para um período de retorno de 50 anos. Portanto, a partir da distribuição acumulada de probabilidades e do período de retorno de 50 anos, obtém-se o valor esperado do esforço de carga accidental (GQ).

2.3 Calibração dos sensores no sistema B-WIM

O processo de calibração é a etapa mais importante durante a instalação dos sensores que compõem o sistema de monitoramento B-WIM. Uma vez que não seja possível realizar o procedimento de calibração prévio ao início do monitoramento da estrutura, podem ser atribuídas aproximações da linha de influência da estrutura utilizando cálculos teóricos. No entanto, os modelos teóricos utilizam simplificações que acabam por desconsiderar muitos efeitos existentes, inerentes ao comportamento real da estrutura.

O processo de calibração do sistema B-WIM utiliza caminhões com peso conhecido e consiste na passagem dos veículos sobre a estrutura instrumentada com os *strain gauges* com passagens significativas para cada veículo. O procedimento de passagem, quantidade e velocidade dos veículos seguem indicação do COST 323 (2002). De modo geral, no processo de calibração são selecionados veículos correlatos com o trânsito atuante sobre a estrutura.

3 Avaliação da segurança de estruturas de concreto

Do ponto de vista dos parâmetros funcionais das estruturas como pontes e viadutos, as normas NBR 9452 (ABNT, 2019) e DNIT 010 (2004) descrevem as características relacionadas pela estrutura no que diz respeito diretamente à vida útil, onde as anomalias podem prejudicar o desempenho. Estas normas também determinam que nas inspeções sejam verificados todos os requisitos geométricos adequados da estrutura, como visibilidade e gabaritos verticais e horizontais íntegros.

Para avaliação da segurança estrutural das pontes é imprescindível o conhecimento das características da seção transversal das vigas e longarinas, bem como os materiais utilizados e a quantidade e disposição das barras de aço ao longo da estrutura. No caso de longarinas protendidas, o projeto estrutural com detalhamento da armadura ativa é tido como de importância significativa. Caso os projetos não sejam disponibilizados, uma alternativa para estimar a capacidade resistente da estrutura é utilizar como base as normas de projetos vigentes na época da construção das pontes em análise. Neste caso, o método de estimativa torna-se menos confiável e, desta forma, deve ser utilizado de maneira prudente. O propósito da avaliação da segurança das pontes, através de ensaios não destrutivos como a instrumentação do sistema B-WIM, é verificar se a estrutura está apta a resistir aos níveis de carregamento aos quais está sendo e será submetida.

3.1 Determinação da resistência estrutural com aplicação do sistema B-WIM

O uso do B-WIM visa auxiliar na identificação das estruturas cujos níveis de resistência estejam próximos à solicitação máxima. Esta tecnologia também pode ser utilizada na catalogação de maneira segura das pontes localizadas em grandes corredores logísticos como forma de auxiliar o governo e os usuários quanto à liberação das chamadas Autorização Especial de Trânsito (AETs). No que diz respeito à avaliação de segurança das pontes, além das características estruturais construtivas, os valores de carga acidental e permanente que atuam sobre a estrutura fazem-se essenciais.

No caso da carga móvel, proveniente do tráfego, o efeito dinâmico causado por este carregamento é estimado por meio do fator de amplificação dinâmica (*Dynamics Amplification Fator* - DAF). Esse fator é estimado através de códigos de projeto, em função do comprimento do vão da ponte e conforme a norma brasileira NBR 7188 (ABNT, 2013). Estudos como o de ŽNIDARIČ (2006) e ARCHES (2009) indicam que os valores teóricos de DAF dos códigos de projeto são considerados conservadores, à medida que os valores decrescem com a carga total nas pontes. Por meio do monitoramento da estrutura com o sistema B-WIM é possível obter o DAF para cada veículo que trafegar sobre a ponte/viaduto sendo função do comprimento da estrutura e do peso bruto total do veículo.

Para os sistemas B-WIM, a determinação do nível de segurança dá-se através do chamado *Rating Fator* (RF) e os cálculos envolvidos são preconizados pela norma EUROCODE (EN B, 2003). Neste trabalho, foram calculados através do software esloveno SiWIM. O cálculo referencial de RF é apresentado pela Equação 1.

$$RF = \frac{\theta \times R_d - \gamma_G \times G_n}{\gamma_Q \times G_Q \times DAF} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

- Φ é o fator de redução da capacidade resistente, obtido com auxílio da inspeção da ponte.
- Rd é a capacidade de carregamento da seção transversal, obtido pelo projeto e pela inspeção da ponte.
- γG é o fator de segurança para majoração dos esforços de carga permanente, conforme NBR:2003 8681, da ABNT.
- γQ é o fator de segurança para majoração dos esforços de carga acidental devido ao tráfego, proveniente do sistema B-WIM.
- Gn são os esforços oriundos da carga permanente da ponte, obtido por inspeção da estrutura ou do projeto.
- GQ são os esforços oriundos da carga acidental, obtido por inspeção da estrutura ou do projeto.
- DAF é o Fator de Amplificação Dinâmica, obtido pelo B-WIM.

Após a definição das variáveis e cálculo do valor de RF, é verificada a segurança da ponte quanto às cargas que está solicitada. De modo geral, os valores obtidos podem ser apresentados como:

- ☐ Com valores de RF inferiores a 1,0 tem-se que a insegurança da estrutura indicando a necessidade imediata de restauração ou manutenção.
- ☐ Para valores de RF entre 1,0 e 1,5 tem-se uma faixa de observação onde a estrutura analisada apresenta a resistência mínima para segurança.
- ☐ Valores de RF superiores a 1,5 indicam que a estrutura apresenta alto nível de segurança e não necessita de intervenções imediatas de manutenção e/ou restauração.

4 Metodologia

Para aplicação da metodologia de ensaios não destrutivos (END) aliada ao sistema B-WIM, foi realizada a instrumentação e monitoramento durante 42 dias de uma ponte de concreto armado e realizado os diversos ensaios necessários para sua avaliação estrutural.

4.1 Seleção da ponte de estudo

A ponte instrumentada está localizada sobre o rio Lambari, na BR-153, no Estado de Goiás, entre as cidades de Uruaçu e de Porangatu. A superestrutura é formada por quatro longarinas apoiadas sobre pilares, com um vão de 15 metros e comprimento total de 22 metros, contando com balanços nas extremidades e cinco transversinas: uma no meio do vão, duas sobre os pilares e duas nas extremidades. A Figura 3 apresenta a ponte sobre o rio Lambari, em (a) sua vista transversal e em (b) a vista do tabuleiro.



(a) Seção transversal



(b) Tabuleiro da ponte

Figura 3 - Superestrutura da ponte sobre o rio Lambari

Na instrumentação não evasiva dessa ponte consistiu na fixação de extensômetros na parte inferior da plataforma, os quais são responsáveis por coletar os sinais gerados pela passagem dos veículos de modo a acompanhar o comportamento da estrutura e por determinar a classificação dos veículos.

4.2 Instrumentação com os *strain gauges*

. Os ensaios preliminares foram realizados através da inspeção visual, da pacometria, da verificação do potencial de corrosão, da esclerometria e do ultrassom. Decorridos os ensaios de caracterização, determinou-se o local de instalação dos *strain gauges*.

A ponte sobre o rio Lambari foi instrumentada somente para análise do efeito momento fletor, os sensores foram instalados nas longarinas no meio do vão e ligados a um sistema de aquisição de dados para coleta de informações. A Figura 4 apresenta a seção transversal da ponte juntamente com o posicionamento dos sensores pra detecção dos momentos fletores (representados em vermelho).

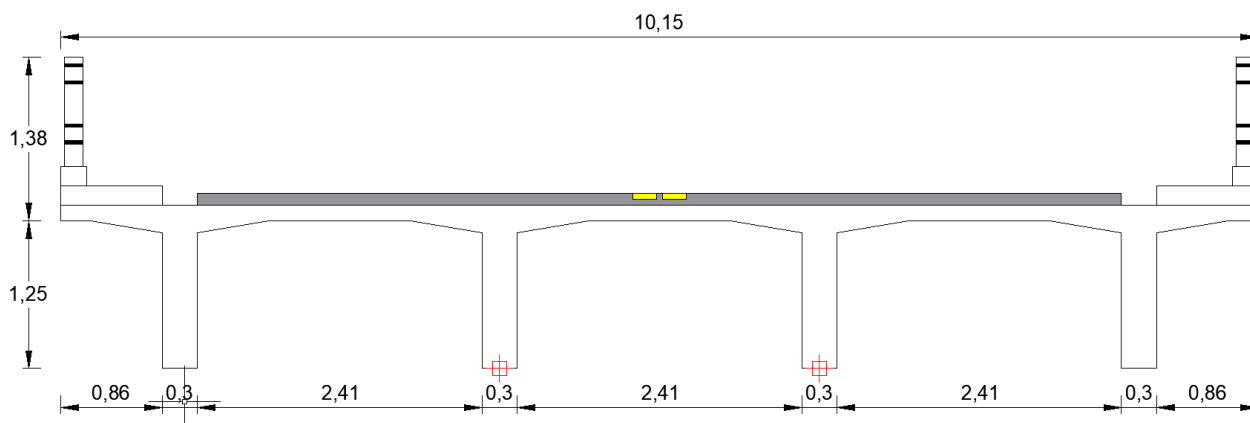


Figura 4 - Seção transversal da ponte sobre o rio Lambari e posicionamento dos sensores

4.3 Calibração do sistema B-WIM

Para realização deste procedimento, cargas móveis foram solicitadas à estrutura e seu comportamento foi observado. Durante o processo de calibração da ponte sobre o rio Lambari foram utilizados dois caminhões com dimensões e PBT conhecidos, sendo um rígido de 3 eixos e com PBT de 26,41 toneladas e outro articulado semirreboque de 5 eixos com PBT de 36,81 toneladas.

4.4 Comportamento das cargas sobre a estrutura

Para cálculo do efeito de cargas, os *strain gauges* instalados na ponte foram utilizados também para o monitoramento do tráfego atuante sobre a estrutura. Este monitoramento fez-se necessário uma vez que as deformações ocasionadas foram utilizadas como previsão do fator de segurança da estrutura. Para avaliação da estrutura, a ponte foi mantida sobre monitoramento constante de tráfego durante 42 dias e, durante esse período, mais de 100 mil veículos foram pesados pelo sistema e organizados em um banco de dados.

4.5 Avaliação da segurança utilizando o sistema B-WIM

Neste trabalho, não se teve acesso aos projetos estruturais da ponte sobre o rio Lambari. Assim, para a determinação da capacidade resistente (R_d) da estrutura foi estabelecido um procedimento de cálculo de modo a estimar a armadura longitudinal de flexão das longarinas. Para uso neste cálculo, foram determinadas as seguintes variáveis:

- ☐ Geometria das vigas de seção I, (obtidas no levantamento de campo).
- ☐ Resistência característica à compressão do concreto (estimada pelo ensaio de esclerometria e informações de literatura, considerando a idade e fluência do concreto, efeitos da carbonatação e a classe de resistência usual na época da construção).
- ☐ Cobrimento de concreto (estimado pelo ensaio de pacometria).
- ☐ Critérios de cálculo da norma NB-1 (ABNT,1960) (Norma vigente durante a construção da ponte).

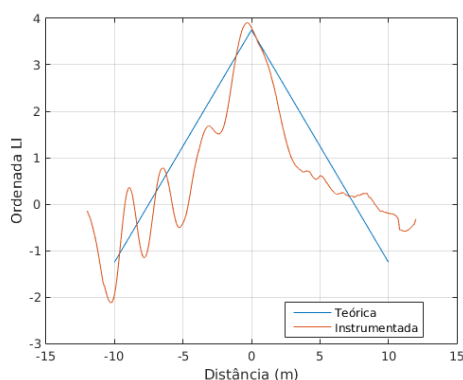
- Esforços internos (estimados a partir da linha de influência teórica, esta obtida com o trem tipo recomendado pelas normas vigentes na época para a classe da ponte em estudo).

5 Resultados

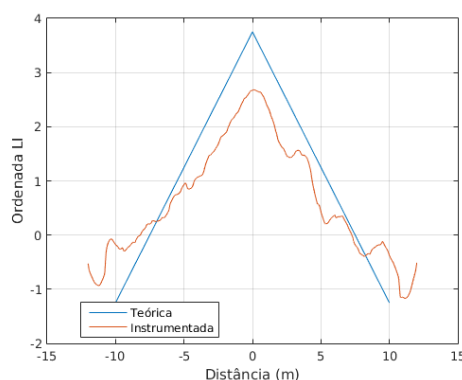
Os resultados são apresentados neste capítulo de forma a evidenciar a importância do uso de sensores e ensaios não destrutivos na avaliação estrutural de pontes e viadutos de concreto armado.

5.1 Procedimento de calibração da ponte instrumentada

Como forma de comparação, a LI real é analisada juntamente com a LI teórica calculada conforme as normas brasileiras. A Figura 5 apresenta a LI real e teórica da ponte sobre o rio Lambari.



(a) Pista 1



(b) Pista 2

Figura 5 - Linhas teóricas e reais da seção transversal da ponte sobre o rio Lambari/GO

A Figura 5 apresenta a comparação entre as linhas de influência teórica e real, obtida pela calibração de um sistema B-WIM, para as duas pistas da ponte sobre o rio Lambari/GO. Apesar de se tratarem da mesma ponte, percebe-se dois cenários distintos. Para a pista 2 (Figura 5b), a linha de influência teórica superestima os esforços gerados por um dado carregamento, atingindo valores cerca de 40% maiores aqueles correspondentes ao comportamento real da estrutura, obtido por sistema B-WIM. Assim, percebe-se que a previsão de esforço gerado por um veículo de grande porte, por exemplo, seria severamente superestimada, o que pode resultar em conclusões conservadoras e distorcidas sobre a capacidade resistente da estrutura, evitadas no caso da utilização da linha de influência real. Desta forma, o monitoramento real permite também uma melhor tomada de decisões quanto à necessidade de intervenção na estrutura para manutenção da segurança.

Para a pista 1 (Figura 5a), a linha de influência real possui valores superiores à teórica, o que gera um alerta em relação à segurança da ponte, mas deve-se levar em consideração que os parâmetros teóricos foram estimados, além de que esta pista apresentava defeitos na entrada da ponte, o que pode ter amplificado os esforços gerados, resultando em valores

superiores ao estimado pela linha de influência teórica. Logo, usar a linha de influência teórica é capaz de subestimar os esforços gerados, principalmente para pontes com maior grau de deterioração.

Assim, mesmo quando se analisa a mesma estrutura, é possível ter resultados distintos para faixa distintas, ambos indicando que apenas a utilização dos valores teóricos é inadequada. Neste caso, para a pista 2 (Figura 5b) uma superestimação dos esforços é notada, enquanto que para a pista 1 (Figura 5a) o valor teórico é desfavorável à segurança, devido às particularidades da pista. Por fim, evidencia-se a necessidade de calibração e monitoramento de pontes de concreto por sistemas B-WIM ao se medir o comportamento real da estrutura, para que as tomadas de decisões sejam melhor embasadas, garantindo a segurança dos veículos e seus passageiros ao mesmo tempo em que não se impõe restrições desnecessárias ao tráfego.

5.2 Comportamento das cargas sobre a estrutura instrumentada

A partir de dados do monitoramento foi verificado que a maior parte dos veículos trafega com valores de PBT entre 8 e 72 toneladas, em ambas as pistas. Os efeitos das cargas como esforços estruturais foram calculados para todos os eventos de carregamento na ponte, através da combinação dos histogramas de PBT com a LI real da ponte. Esses efeitos, em termos de momentos fletores, são apresentados na Figura 6 para as pistas 1 e 2, respectivamente.

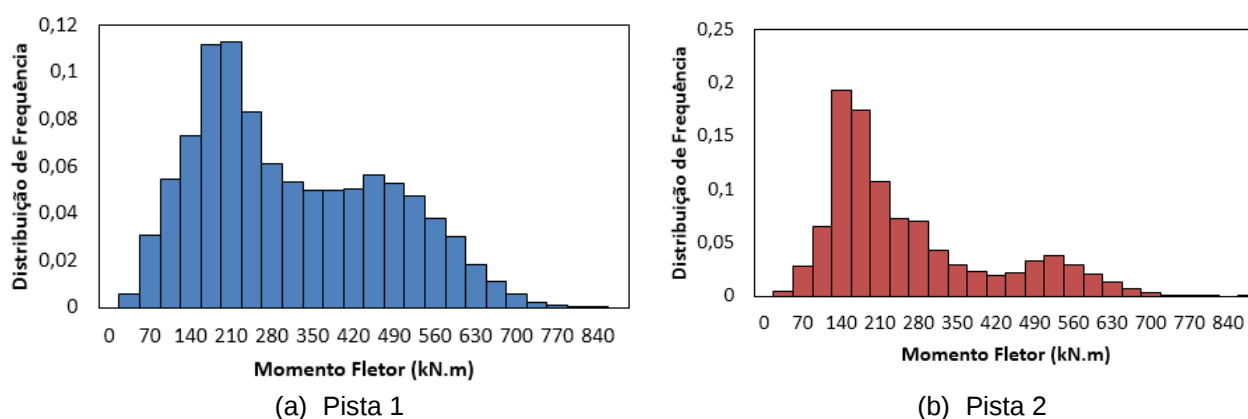


Figura 6 - Histograma de Momento Fletor dos veículos que passaram na ponte sobre o rio Lambari/GO

A partir dos histogramas de esforços, foi realizada uma estimativa dos esforços máximos que podem ocorrer na ponte com o passar dos anos, conforme Figura 7.

O valor de esforço máximo de momento para verificação de segurança foi de $G_n = 3.322,7$ kNm.

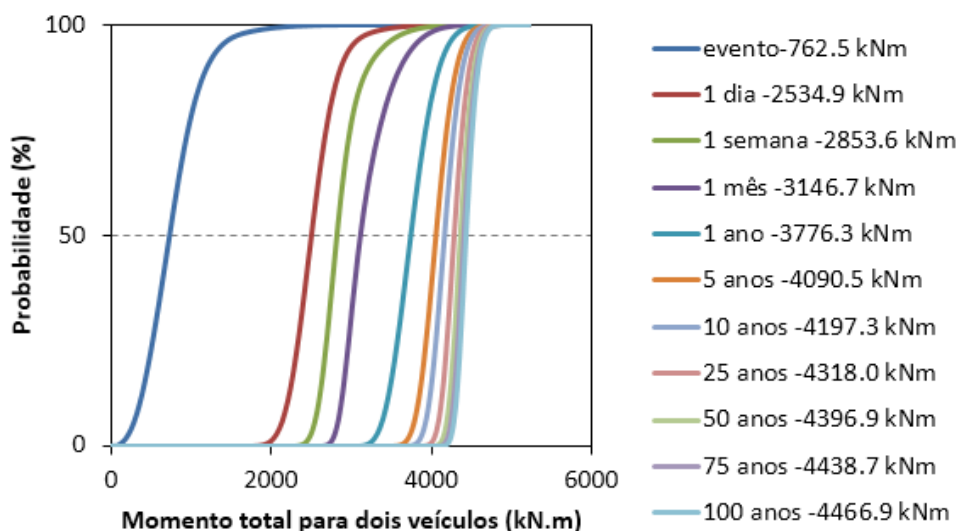


Figura 7 - Previsão de momento fletor máximo para a ponte sobre o rio Lambari/GO

5.3 Avaliação do fator de segurança da ponte instrumentada

Uma vez que não foram obtidas informações reais de projeto, estas foram estimadas. Entretanto, certa cautela foi utilizada uma vez que estes valores induzem à estimativa das condições de contorno diminuindo o grau de confiança dos valores. Para verificação da segurança da ponte sobre o rio Lambari foi utilizado o cálculo do fator de segurança RF, apresentado pela Equação 1. A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados para o cálculo de RF para este trabalho.

Tabela 1 – Parâmetros para avaliação da segurança da ponte sobre o rio Lambari/GO

Φ	γ_G	γ_Q	G_n (kNm)	G_Q (kNm)	DAF	R_d (kNm)
0,85	1,2	1,3	1.326,3	4.396,9	1,15	4x3.273,0

Por meio desses parâmetros obteve-se um coeficiente RF igual a 1,45 para a segurança da ponte, indicando que a mesma está em segurança, mas exige atenção especial quando à passagem de grandes cargas ou caso o volume de tráfego da rodovia aumente de maneira abrupta.

6 Exemplo de aplicação

A partir da identificação dos fatores relacionados com a avaliação estrutural de pontes e viadutos de concreto armado por meio de ensaios não destrutivos (END), apresenta-se um exemplo de aplicação dessa metodologia.

Neste modelo, a avaliação da segurança da ponte teve sua metodologia adaptada para um modelo no qual um carregamento extremo de características conhecidas foi aplicado sobre a estrutura. Intencionalmente, espera-se que com a variação da carga aplicada na estrutura tenha-se variabilidade no valor de RF e com isso resultados hipotéticos que possam aliar ao comportamento estrutural da ponte com o monitoramento de tráfego por meio de *strain gauges*.

Para este modelo de aplicação, o cálculo do fator de resistência RF foi mantido através da Equação 1 com adaptações na caracterização do carregamento accidental. Os 42 dias de carregamento foram mantidos, entretanto, todos os veículos que trafegaram sobre a ponte foram analisados e um valor de DAF gerado de forma individual.

Para inserção na Equação 1, o intervalo de confiança de 99% dos valores de DAF foi utilizado com base na equação descrita pelos valores unitários de DAF em relação ao PBT dos veículos, apresentados pela Figura 8.

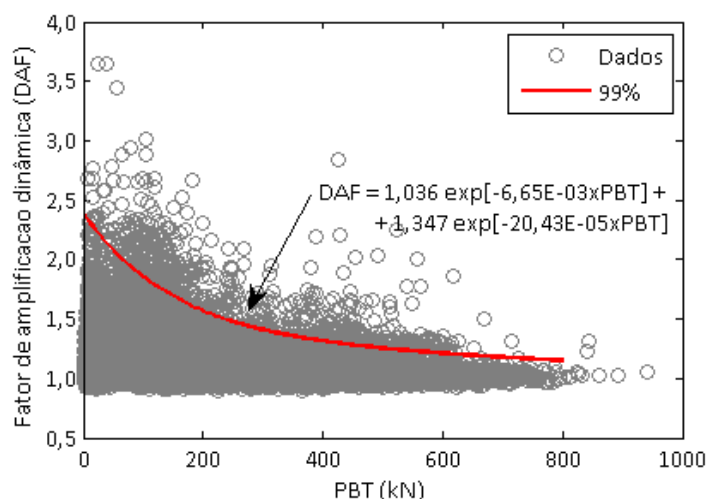


Figura 8 - Intervalo de confiança de DAF para ponte sobre o Rio Lambari

Através desta equação, é possível obter o valor de DAF para qualquer veículo com PBT conhecido e que trafegue por essa ponte.

Para exemplificação da importância da verificação da segurança estrutural de pontes e viadutos por meio de ensaios não destrutivos (END) com *strain gauges*, dois exemplos serão realizados. Ambos os exemplos utilizarão a carga de um caminhão de 9 eixos, com PBT combinado (tara + carga) de 11,5 toneladas e que normalmente transporta cargas especiais. Os dois exemplos apresentarão diferenciação quanto ao uso ou não dos dados obtidos por meio da instrumentação e sua relação na resposta da segurança da estrutura.

6.1 Exemplo 1 – Uso de valores provenientes da instrumentação

O exemplo 1 apresenta dados obtidos a partir da instrumentação da ponte sobre o Rio Lambari/GO. Após o procedimento de calibração utilizando o caminhão de 9 eixos descrito anteriormente, foram obtidas informações como a Linha de Influência (LI) real, apresentada na Figura 9.

Para o caminhão exemplificado e para a LI real calculada, o momento fletor máximo ocorre quando o centro dos eixos do semirreboque está sobre o meio do vão central da ponte, ou seja, no pico da LI. Nessa condição, a unidade de tração já deixou a ponte e, portanto, seus três primeiros eixos não introduzem esforços. Com esse posicionamento dos eixos, o momento máximo introduzido foi de 996,3 kNm. O veículo tipo da norma, quando posicionado no meio do vão central, introduz um momento fletor máximo igual a 1.024,0 kN. Dessa forma, o esforço variável máximo GQ é igual a 2020,30 kNm.

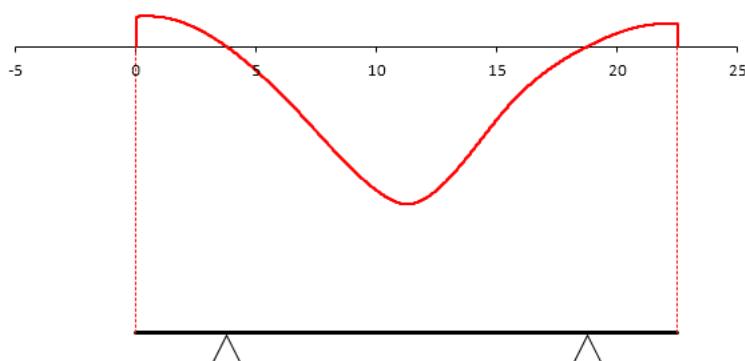


Figura 9 - Linha de Influência (LI) da ponte sobre o rio Lambari para o modelo apresentado

Utilizando o valor do PBT combinado deste veículo na equação da Figura 8, tem-se ao resultado de 1,10 para DAF. A Tabela 2 apresenta o resumo dos parâmetros envolvidos no cálculo do fator RF.

Tabela 2 – Parâmetros para avaliação da segurança da ponte sobre o rio Lambari obtidos pelo B-WIM.

Φ	γ_G	γ_Q	G_n (kNm)	G_Q (kNm)	DAF	R_d (kNm)
0,85	1,2	1,3	1.326,3	2020,3	1,10	4x3.273,0

Utilizando os parâmetros obtidos para aplicação da Equação 1 para a longarina mais solicitada por meio de instrumentação B-WIM, tem-se a Equação 2 com os valores substituídos.

$$RF = \frac{0,85 \times 3.273 - 1,2 \times 331,57}{1,3 \times 923,27 \times 1,10} = 1,81 \quad (\text{Equação 2})$$

No caso desta exemplificação, a ponte apresenta resistência suficiente para a passagem deste veículo e não oferece riscos aos demais usuários da via. O valor de 1,81 além de conferir a resistência da estrutura também indica que a mesma não necessita de medidas emergenciais de restauração e manutenção.

6.2 Exemplo 2 – Utilizando dados normalizados sem instrumentação

O mesmo caminhão, com 9 eixos, com PBT combinado (tara + carga) de 11,5 toneladas e que normalmente transporta cargas especiais foi utilizado para este exemplo. Entretanto, os valores utilizados correspondem às referências normativas, considerando que não foi realizada a instrumentação da ponte com *strain gauges*.

Para obtenção do fator de resistência RF, foi utilizada a Equação 1 e os parâmetros disponibilizados pelas normas brasileiras como forma de verificar a diferença em relação ao valor de RF por meio da instrumentação dos sensores e de forma teórica.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros de RF conforme as normativas brasileiras para a ponte sobre o rio Lambari/GO.

Tabela 3 – Parâmetros para avaliação da segurança da ponte sobre o rio Lambari obtidos pelo B-WIM.

Φ	γ_G	γ_Q	G_n (kNm)	G_Q (kNm)	DAF	R_d (kNm)
0,85	1,54	1,5	1.326,3	1.433,6	1,33	4x3.273,0

Utilizando os parâmetros obtidos para aplicação da Equação 1 para a longarina mais solicitada e com base nos valores obtidos de forma teórica pelas normas brasileiras, tem-se a Equação 3 com os valores substituídos.

$$RF = \frac{0,85 \times 3.273 - 1,54 \times 331,57}{1,5 \times 1.292,6 \times 1,33} = 0,88 \quad (\text{Equação 3})$$

Conforme o valor calculado no exemplo utilizando normas brasileiras o resultado de RF foi inferior a 1,0 assim, conforme a metodologia utilizada este veículo não poderia transitar sobre a estrutura de forma que a mesma não apresenta capacidade resistente suficiente. A segurança dos usuários da via estaria comprometida conforme este exemplo. Esta estrutura poderia oferecer risco aos usuários uma vez que necessita de manutenção e restauração de forma imediata.

7 Conclusões

O monitoramento de uma ponte através de ensaios não destrutivos, utilizando-se de sensores de deformação (*strain gauges*), foi apresentado nesse trabalho. As premissas necessárias, como os ensaios preliminares, a instrumentação, a calibração, além da coleta e análise dos dados foram as etapas seguidas para uma correta avaliação da capacidade resistente da ponte de concreto armado selecionada. O sistema *Bridge Weigh-in-Motion* (B-WIM) embasou os procedimentos envolvidos.

Comparou-se dados obtidos através da instrumentação com dados teóricos normativos, na qual resultou em valores de até 40% de diferença. Os dados obtidos em campo mostram que os valores usualmente utilizados para avaliação das pontes, através de dados teóricos, são conservadores e podem estar impedindo o tráfego de veículos que tecnicamente estavam aptos a passar pela ponte.

Com um conjunto de dados de monitoramento na ponte instrumentada foi possível obter também, uma equação de DAF que pode ser utilizada para qualquer veículo que passe pela ponte. Com o valor de DAF, é possível obter o valor de RF para determinar se a ponte estará segura ou não para o tráfego desse veículo. No exemplo apresentado, um veículo de 9 eixos não poderia transitar, se fossem considerados apenas os estudos embasados nos dados teóricos, mas caso fossem considerados os valores reais através da instrumentação, o veículo estaria seguro e apto a transitar pela ponte.

Assim, conclui-se que há a possibilidade de obter maior acurácia nos dados estruturais para as tomadas de decisão em relação à liberação do tráfego de veículos pesados em pontes e viadutos.

8 Referências

ARCHES. Report D08: Recommendations on bridge traffic load monitoring. **Brussels: European Commission**. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9452: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2019.

COST 323. Weigh in motion of road vehicles. Final Report, Appendix 1 European WIM Specification, **LCP publication**, Paris, 2002.

DENG, L; WANG, W; YU, Y. State-of-the-art review on the causes and mechanisms of bridge collapse. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, ASCE, v. 30, n. 2, p. 1-13, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 010: Inspeção em pontes e viadutos de concreto armado e protendido**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2004.

EN B. 2 Eurocode 1: Actions on Structures-Part 2: Traffic Loads on Bridges. **London: British Standard Institution**. 2003.

FERREIRA, L. M. **Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

JUNGES, P. **Análise de fadiga em pontes curtas de concreto armado a partir de dados de sistemas B-WIM**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Brasil, 2017.

LORENZI, A., REGINATO, L. A., LORENZI, L. S., & SILVA FILHO, L. C. P. Emprego de ensaios não destrutivos para inspeção de estruturas de concreto. **Revista de Engenharia Civil IMED**, 2016.

MASCARENHAS, F.J. R., CARVALHO, R. C., VITÓRIO, J. A. P. Uma análise das atuais condições das pontes e viadutos das rodovias brasileiras. **61º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2019**, Fortaleza, Brasil. 2019.



Anais do
62º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2020
Setembro / 2020



@ 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

MILANEZ, M. O. **Influência do vento na detecção de defeitos em estruturas de concreto utilizando termografia infravermelha.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

SHINOHARA, K. J; PADARATZ, I. J; VALENTE, A. M; TANI, V. Z E DE MORI, F. Bridge weigh-in-motion (B-WIM) as the main tool for issuing special traffic authorizations (AETs) in Brazil. **8th International Conference on Weigh-In-Motion.** Prague, 2019.

ŽNIDARIČ, A. SAMARIS Programme. Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure-Guidance for the optimal assessment of highway structures. **Deliverable SAM-GE-D30 EU 6th framework report**, 2006.

ŽNIDARIČ, A., KALIN, J., KRESLIN, M., MAVRIČ, M. Recent Advances in Bridge WIM Technology, **Proc.7th International Conference on WIM**, Foz do Iguaçu, Brazil, 2016.