

Using peak-to-peak acceleration to define damages from reinforced concrete Brazilian bridges

Jorge Dalmas Braido¹, Zacarias Martin Chamberlain Pravia²

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGEng) from UPF/ Email:
jorgebraido@gmail.com

²Professor at Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGEng) from UPF/ Email:
zacarias@upf.br

Abstract

In Brazil, among the existing bridges, the use of reinforced concrete predominates along with the structural solution formed by two spans with overhangs at the ends. Due to the material and characteristics of adopted structural solution, it is possible to identify a Brazilian pattern of bridges and identify damages that most affect this typology. This work presents the use of peak-to-peak acceleration as an indicator that helps visual inspection in the definition of damage. The case studies are two reinforced concrete viaducts located in Rio Grande do Sul that can be classified as Brazilian bridges due to their material and characteristics. The results indicate that this quantitative behavior value can be useful in the definition of damage in reinforced concrete bridges used as an additional tool.

Keywords

Bridges; reinforced concrete; peak-to-peak acceleration; damages

Introdução

No Brasil, a análise do inventário do DNIT apresenta que predominam sobre o território nacional pontes executadas em concreto armado. Isto pode ser confirmado a partir de Oliveira, Greco e Bittencourt (2019), os quais analisaram os registros de 4732 pontes deste inventário e indicaram que 99,2% das pontes são construídas com este material.

Desta análise ainda é possível identificar que a maioria das pontes são instaladas em superfícies planas e mais de 93% apresentam duas vigas. A maioria das pontes instaladas em rodovias federais foram construídas sobre rios – 74% das pontes.

A largura das faixas de tráfego é igual ou menor a 3,60 metros em 65%. A falta de uso de equipamentos de acesso faz com que 47% das pontes possuam aparelhos de apoio sem definir o tipo, a função e o estado de dano.

A deficiência mais observada foram os guarda-corpos obsoletos em 42% das pontes; a ausência ou passeios laterais em 60% das pontes e passeios laterais menores que 2,50 m em 28% pontes. Um elevado nível de tráfego de veículos pesados foi verificado em 49% das pontes. Com este levantamento pode-se definir a seção transversal mais comum no país e que é apresentada na Figura 1.

Segundo Rodrigues, Casas e Almeida (2013), a popularidade desta solução estrutural é explicada por razões econômicas e por possuir relativa simplicidade de construção. A superestrutura é composta de tabuleiro que se apoia sobre duas longarinas, todos em concreto armado. Normalmente, a superestrutura é suportada por apoios elastoméricos ou placas de chumbo instaladas sobre os pilares. Nestas pontes, as partes dos tabuleiros em balanços se apoiam em aterros que em algumas vezes se apresentam mal compactados e sem a proteção apropriada.

Na zona de transição – entre ponte e talude – as condições de rugosidade do pavimento podem se tornar ruins. Isto provoca o choque dos veículos ao entrarem na ponte e modifica o carregamento experimentado pela estrutura, reduzindo a vida útil à fadiga e atingindo os estados limites de serviço. Além disso, as longarinas em balanço apresentam deslocamentos significativos nas extremidades em balanço.

Outras características consideradas padrão das pontes brasileiras podem ser verificadas em Mendes (2009), que possui informações de 5619 pontes: 63% das pontes tem comprimento inferior a 50 metros; 79% das pontes possuem largura total inferior a 12 metros; 50% das pontes possuem um vão ou um vão com dois balanços e; 93% das pontes possuem vão inferior a 40 metros. Assim, é possível chegar a configuração padrão das pontes em concreto armado instaladas em solo brasileiro, a qual é apresentada na Figura 2.

Ao iniciar a ampliação da malha rodoviária brasileira, fenômeno observado a partir de 1940, podem ser verificadas no Manual de inspeção de pontes rodoviárias do DNIT (2004) a variação das dimensões dos elementos estruturais, bem como a evolução dos carregamentos de projeto. As características das pontes do Brasil é, portanto, heterogênea.

Esta heterogeneidade somado à ampla fonte de danos a que estas estruturas estão expostas – de operação, de ambiente, de projeto, de execução, por inspeções e manutenções deficitárias – podem ser responsáveis pela diminuição da vida útil ou comprometimento da capacidade de operação, o que oferece riscos aos usuários. Assim, a execução de inspeções como primeira etapa de investigação de danos e classificação de desempenho se torna vital.

Segundo Lin e Yoda (2017), para se obter os melhores resultados em uma inspeção deve-se começá-la no topo da ponte e conduzir o trabalho no sentido do caminho percorrido pelas cargas, desta maneira pode se garantir a investigação total da estrutura. O caminho das cargas se refere à analogia com a ordem do carregamento da estrutura em serviço: as cargas oriundas do tráfego são aplicadas ao tabuleiro, na sequência os esforços seguem para as vigas e transversinas, aparelhos de apoio, pilares e, por último, fundação, chegando ao solo, respectivamente.

O correto planejamento visa minimizar a subjetividade sobre o resultado final, já que este pode ser influenciado por fatores como a iluminação, o treinamento, a padronização, privação do sono, idade da equipe, experiência, entre outros. Outras preocupações tem origem nos dados que são criados a partir da investigação, os quais podem ser incompletos, inconsistentes e subjetivos (MEGAW, 1979; McROBBIE, WRIGHT e CHAN, 2015).

Além disso, segundo Matarazzo et al (2020), as avaliações realizadas com base em inspeções visuais limitam de forma severa as frequências das análises de saúde estrutural, o valor da informação coletada e a capacidade de programar uma manutenção preventiva (AN et al, 2019; MORGENTHAL et al, 2019).

Na busca por minimizar a subjetividade do resultado final da inspeção visual, pode-se fazer uso da aceleração de pico-a-pico que considera o comportamento da estrutura. Este indicador é simplesmente uma medição da amplitude de uma forma de onda considerada e que abrange do pico positivo ao pico negativo de um registro da aceleração. A Figura 3 apresenta a definição da aceleração de pico-a-pico (RAWLINS, 2000).

Casas e Moughty (2017) apresentam uma relação entre a magnitude do dano e a intensidade da vibração que considera a aceleração pico-a-pico de amostras extraídas à metade do vão. Esta observação foi realizada a partir da passagem de um veículo com 450 kN, em condição de tráfego normais, em doze pontes em concreto armado presentes no Brasil.

Pode-se observar a existência de um limite de aceleração em torno de 0,15g, o qual poderia ser indicado como um fator de projeto para garantir a segurança e a durabilidade de tabuleiros de pontes. Valores abaixo deste limite possuem um índice de dano negativo e representam uma ponte saudável. Valores de aceleração maiores que 0,15g indicam um nível de dano positivo. Além disso, valores de aceleração pico-a-pico próximos de 0,17g podem indicar danos relacionados à fadiga.

A definição da aceleração de pico-a-pico exige o uso da extração de amostras de comportamento da estrutura. Deste modo, o uso de smartphones de celulares para esta tarefa tem se consolidado nos últimos anos.

Segundo Feldbusch, Sadegh-Azar e Agne (2017), ao utilizar o acelerômetro de celulares é necessário o uso de um filtro Butterworth passa banda de primeira ordem devido à baixa qualidade em uma faixa de frequência igual a 0,5 Hz, a qual corresponde a um ruído rosa. Segundo Ribeiro e Lameiras (2019), é necessário utilizar um filtro passa-alta de 1 Hz para eliminar a influência de picos de baixas frequências.

A definição da ordem determina a atenuação atingida. Segundo Wenzel (2009), a influência da ordem do filtro considera que quanto maior a ordem, maior a discrepância. Bons resultados são obtidos para um filtro de primeira ordem ou igual a 1, a qual é configuração mais simples para o filtro.

Segundo Thompson (2013), a classe de filtros Butterworth é conhecido como um filtro de frequência, pois a informação é guardada na forma de amplitude, frequência e fase dos componentes sinusoidais. Tem o objetivo de separar uma faixa de frequência de outra indesejada.

O objetivo deste estudo é definir a existência de danos a partir da aceleração de pico-a-pico. É realizado através do uso de um acelerômetro de um smartphone. São executadas as etapas de calibração a partir do método apresentado em Stančín e Tomažič (2014). É realizada também a inspeção visual dos dois viadutos em concreto armado situados em Passo Fundo/RS utilizados como estudo de caso.

Materiais e programa experimental

Estudos de caso

Os estudos de caso são dois viadutos situados na cidade de Passo Fundo/RS. Apresentam a estrutura em concreto armado composta por longarinas em balanço nas extremidades e tabuleiro. Esta configuração é a mais comum no Brasil. A Figura 4 apresenta em (a) o viaduto V1 e em (b) o viaduto V2 onde é possível identificar as dimensões em centímetros.

Materiais e métodos

Foram utilizados como equipamentos básicos um celular e um computador. O celular utilizado foi o Motorola Moto Z force 2, que possui acelerômetro triaxial com resolução de 0,0023956299 m/s² e taxa de amostra de 428 Hz. A aplicação de celular foi o Vibration Alarm, desenvolvido pela Mobile Tools, a qual é gratuito, apresenta as acelerações na tela em tempo real e permite o salvamento de dados. O sistema operacional é o Android 9.

No computador foi realizado o processamento de dados através do software Scilab. Foram executados a calibração, a aplicação do filtro Butterworth passa-banda de ordem igual a 1, com configuração de frequências baixa de 1 Hz e alta de 40 Hz. A escolha das frequências se deve à característica do smartphone, que insere ruído colorido em baixas frequências e considerou a máxima frequência de 30 Hz, encontrada por Castellanos-Toro et al (2018) – o qual fez um levantamento das características dinâmicas de pontes e passarelas na cidade de Santiago de Cali, Colombia, utilizando celulares. A frequência utilizada foi ainda maior.

Com os dados filtrados e ainda no domínio do tempo, os valores de aceleração pico-a-pico e índice de dano DI foram definidos.

Junto ao processamento de dados foi realizado uma inspeção visual sobre os estudos de caso e apresentam-se, ao final do estudo, os principais danos encontrados.

Levantamento de dados

Nos viadutos, o celular foi posicionado sobre um dos passeios públicos laterais, à metade do vão – L/2, sendo fixado com fita dupla face para evitar o deslizamento do aparelho sobre a superfície de concreto.

As amostras possuíam duração de cinco minutos. Como era previsto o uso do filtro Butterworth para minimizar a interferência de fontes de ruído sobre o sinal, o início do salvamento de dados não estava

vinculado a uma condição específica de trânsito. O mesmo é válido quando era necessário finalizar o salvamento de dados após decorridos os cinco minutos.

A definição do tempo de duração da amostra não obedece qualquer norma e foi definido de forma deliberada.

Foram extraídas cinco amostras em cada viaduto, totalizando dez amostras.

Processamento de dados

Os dados extraídos passavam por etapas de seleção, preparação e definição da aceleração de pico-a-pico.

Na etapa de seleção eliminavam-se as acelerações com origem na operação do aparelho pelo toque do operador na tela do celular.

Na etapa de preparação aplicava-se o filtro Butterworth e se definia a aceleração pico-a-pico de modo a classificar o índice de dano DI.

O valor da aceleração de pico-a-pico é definido pela Equação (1):

$$Aceleração_{pico-a-pico} = ac_{max+} - ac_{ma-} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

ac_{max+} é a aceleração máxima positiva;

ac_{max-} é a aceleração máxima negativa.

Definição da existência de dano DI

Ao conhecer a aceleração de pico-a-pico é possível definir a existência de dano DI dos viadutos. A Figura 5 apresenta a máxima aceleração pico-a-pico em relação ao índice de dano DI. É possível identificar uma mudança na taxa de dano a partir da aceleração igual a 0,15g.

As linhas de regressão calculadas para obter índices de dano DI a partir da aceleração máxima de pico-a-pico são apresentadas nas Equações (2) e (3). A Equação (2) representa a linha ascendente, onde as acelerações máximas de pico-a-pico são menores que 0,15g; enquanto a Equação (3) representa o trecho retilíneo onde as acelerações máximas de pico-a-pico maiores que 0,15g até 0,30g. A Equação (3) apresenta uma correlação de 96%, a qual demonstra uma boa confiabilidade em termos de relação entre dano e a máxima aceleração pico-a-pico.

$$DI = 30,613 \times ac_{max,p-p} - 4,308 \quad \text{Equação (2)}$$

$$DI = 0,381 \times ac_{max,p-p} + 0,044 \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

DI é o índice de dano

Viaduto V1

Os resultados obtidos para o viaduto V1 são apresentados na Tabela 1. É possível observar que a aceleração de pico-a-pico foi menor que 0,15g e representa uma condição saudável, com índice de dano DI negativo.

A inspeção visual aplicada ao viaduto V1 indicou uma nota igual a 5 para os parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade. Foram encontradas manchas escuras devido à umidade nas extremidades laterais em balanço em todo o comprimento e manchas brancas que podem estar associadas ao início da eflorescência na mesma região.

A parte inferior do tabuleiro apresentava linhas brancas, que podem estar associadas à eflorescência, marcavam a superfície do concreto de forma bastante suave e se desenvolviam no sentido transversal, localizadas nas regiões próximas à metade do vão e em uma das extremidades longitudinais. A Figura 6 apresenta as linhas brancas que marcavam a parte inferior do tabuleiro e que podem estar associadas à eflorescência.

Viaduto V2

Os resultados obtidos para o viaduto V2 são apresentados na Tabela 2. Assim como no viaduto V1, a aceleração de pico-a-pico foi menor que 0,15g e representa um condição saudável, com índice de dano DI negativo.

A inspeção visual aplicada ao viaduto V2 indicou nota final igual a 4 para os parâmetros estrutural e de durabilidade. O parâmetro funcional recebeu nota final igual a 5.

Na parte inferior do tabuleiro existiam manchas escuras de percolação de água nas proximidades dos dutos. As manchas atingiam a parte inferior do tabuleiro, a lateral das longarinas e os aparelhos de apoio; nas longarinas existiam quebras de material sem à exposição das armaduras.

Próximo a um dos dutos foram identificadas armaduras aparentes e manchas brancas que podem estar associada à eflorescência. Na parte inferior do tabuleiro existiam linhas brancas de forte e fraca expressão que se desenvolviam no sentido transversal e lembravam eflorescências localizadas em regiões próximas às transversinas intermediárias e na região da metade do vão; em uma das extremidades do viaduto existiam pontos distribuídos com cor avermelhada, os quais tinham aspecto visual de elementos sob estado de corrosão. A Figura 7 apresenta as manchas de percolação de água, a armadura exposta e as linhas brancas que lembram eflorescências.

Figuras e Tabelas

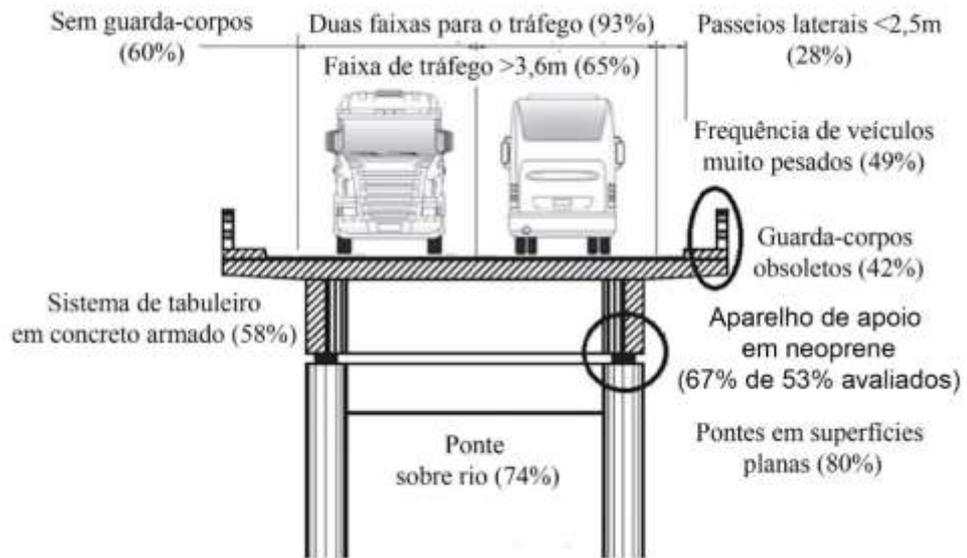


Figura 1 - Seção transversal padrão das pontes no Brasil (Oliveira, Greco e Bittencourt, 2019)

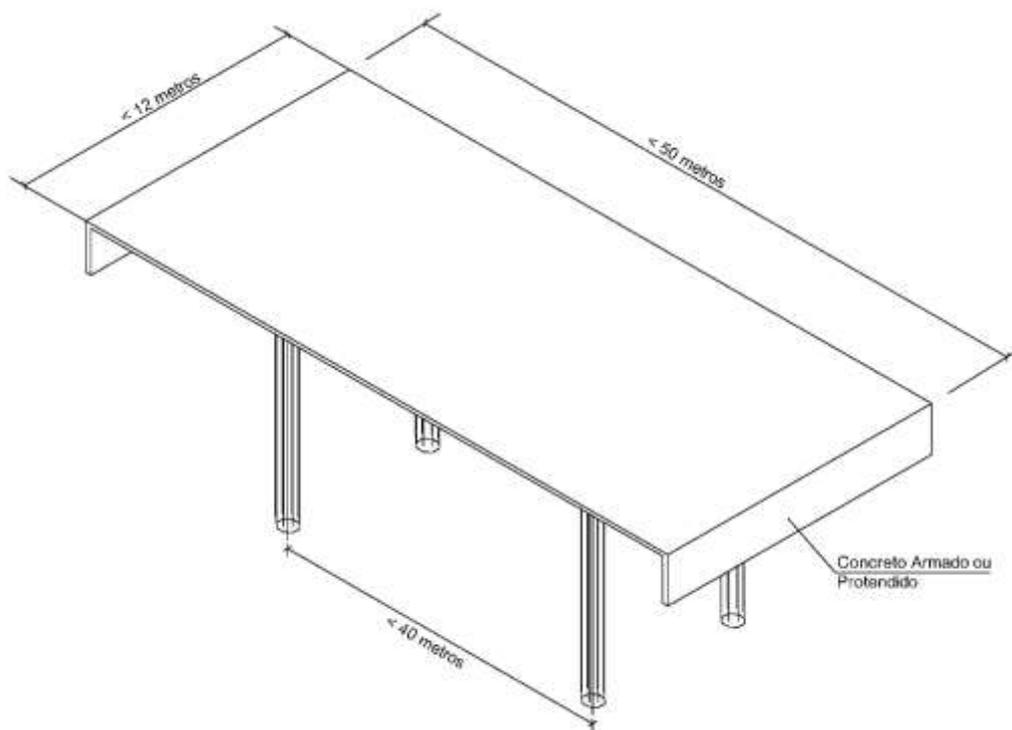


Figura 2 - Modelo geral das pontes brasileiras (Mendes, 2009)

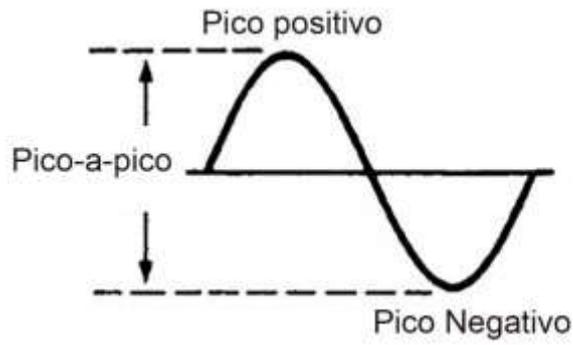


Figura 3 - Aceleração de pico-a-pico (Rawlins, 2000)

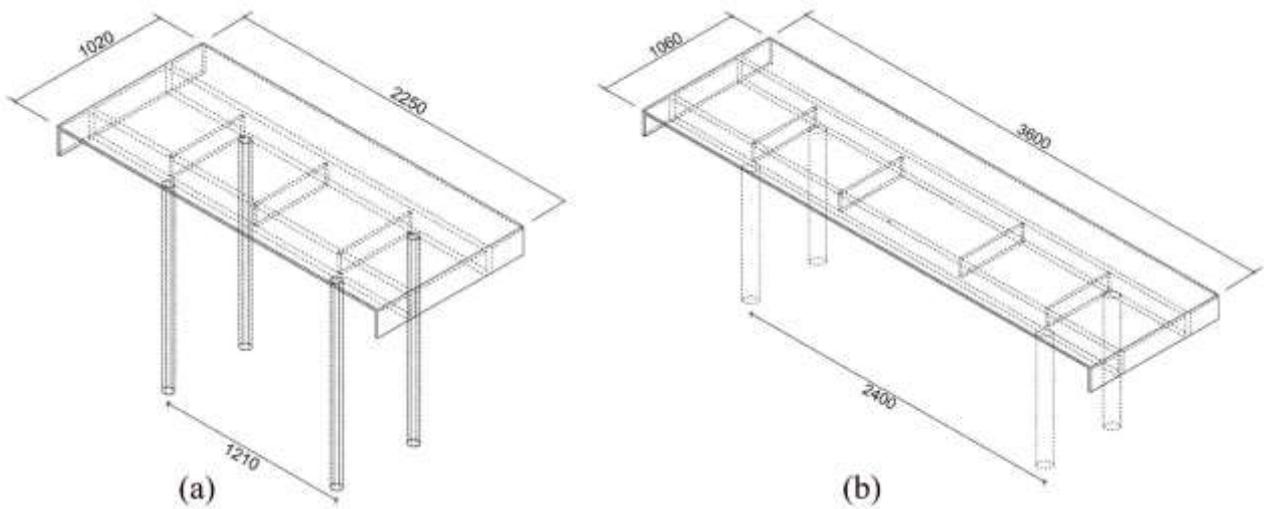


Figura 4 – Estudos de caso

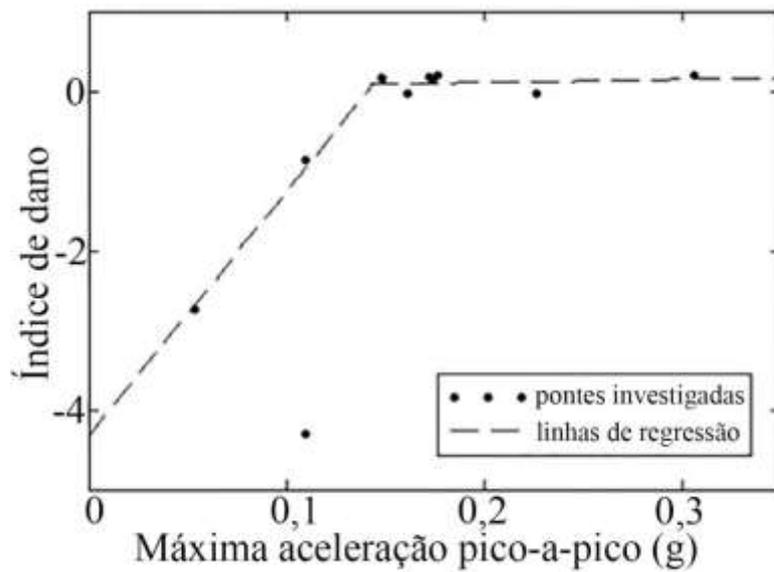


Figura 5 - Aceleração pico-a-pico em relação ao índice de dano DI (Casas e Moughty, 2017)

Tabela 1 - Aceleração de pico-a-pico do viaduto V1

Amostra	A_{\max} (m/s ²)	A_{\min} (m/s ²)	Pico-a-pico (m/s ²)	Condição	DI
1	0,305	-0,312	0,618	<0,15g	-2,38
2	0,233	-0,240	0,473	<0,15g	-2,83
3	0,269	-0,343	0,613	<0,15g	-2,40
4	0,254	-0,270	0,524	<0,15g	-2,67
5	0,232	-0,248	0,481	<0,15g	-2,81

A_{\max} = aceleração máxima de pico; A_{\min} = Aceleração mínima de pico;



Figura 6 - Principal dano em V1

Tabela 2 - Aceleração de pico-a-pico do viaduto V2

Amostra	A_{\max} (m/s ²)	A_{\min} (m/s ²)	Pico-a-pico (m/s ²)	Condição	DI
6	0,053	-0,041	0,094	<0,15g	-4,01
7	0,047	-0,052	0,099	<0,15g	-4,00
8	0,030	-0,037	0,068	<0,15g	-4,01
9	0,047	-0,049	0,096	<0,15g	-4,04
10	0,040	-0,046	0,087	<0,15g	-4,03

A_{\max} = aceleração máxima de pico; A_{\min} = Aceleração mínima de pico;



Figura 7 - Principal dano em V2

Conclusões

Este trabalho apresentou aspectos referentes à principal solução estrutural utilizada no país a partir de 1940. Composta por elementos em concreto armado e formada por tabuleiro e duas longarinas que popularizou-se devido à economia e simplicidade de execução. Porém, é também responsável pelo surgimento de danos.

A realização da extração de amostras se mostrou facilitada devido ao uso de celulares. Convém destacar que por não ser um equipamento profissional para a aquisição de dados estruturais, é essencial a realização da etapa de calibração. Etapa que não consta no trabalho mas que foi executada tal qual em Braido e Pravia (2022) e que segue o método apresentado por Stančín e Tomažič (2014). Os resultados para as acelerações de pico-a-pico obtidas para os estudos de caso indicam que as pontes estão saudáveis. A inspeção visual e os registros fotográficos apresentados conduzem ao mesmo resultado

A fácil definição da aceleração de pico-a-pico estimula o seu uso na definição de danos. É importante destacar que seu uso não deve ser realizado de forma exclusiva e o mais indicado é que outras metodologias de inspeção, definição e classificação de danos devem ser executadas de forma concomitante.

Referências

- AN, Y; CHATZI, E; SIM, S; LAFLAMME, S; BLACHOWSKI, B; OU, J. Recent progress and future trends on damage identification methods for bridge structures, *Struct Control Health Monit.*, p. 1-30, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/stc.2416> >
- BRAIDO, D, J; PRAVIA, C, M, Z. Application of MEMS accelerometer of smartphones to define natural frequencies and damping ratios obtained from concrete viaducts and footbridge, *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*, vol. 15, 2022. Disponível em: < , <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000200006>>
- CASAS, R, J; MOUGHTY, J, J. Bridge Damage Detection Based on Vibration Data: Past and New Developments, *Frontiers in Built Environment*, v. 3, p. 1-12, 2017. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.3389/fbuil.2017.00004> >
- CASTELLANOS-TORO, S; MARMOLEJO, M; MARULANDA, J; CRUZ, A; THOMSON, P. Frequencies and damping ratios of bridges through Operational Modal Analysis using smartphones, *Construction and Building Materials*, p. 490-504, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.089> >
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES – DNIT. Manual de inspeção de pontes rodoviárias. Rio de Janeiro: IPR, Publicações, p. 253, 2004.
- FELDBUSCH, A; SADEGH-AZAR, H; AGNE, P. Vibration analysis using mobile devices (smartphones or tablets), *Procedia Engineering*, v. 199, p. 2790-2795, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.543> >
- LIN, W; YODA, T. Bridge engineering: classifications, design loading, and analysis methods. 1 Ed., Reino Unido: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-804432-2
- MATARAZZO, J, T; KONDOR, D; SANTI, P; MILARDO, S; ESHKEVARI, S, S; PAKZAD, N, S; RATTI, C. Crowdsourcing Bridge Vital Signs with Smartphone Vehicle Trips, *Computers and Society; Applied Physics*, 2020.
- McROBBIE, G, S; WRIGHT, A, M; CHAN, A. Can technology improve routine visual bridge inspections? *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, p. 197-207, 2015. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1680/jbren.12.00022> >
- MEGAW, D, E. Factors affecting visual inspection accuracy, *Applied Ergonomics*, v.10, p.27-32, 1979. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(79\)90006-1](https://doi.org/10.1016/0003-6870(79)90006-1) >
- MENDES, C, T, P. Contribuições para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo (Tese de doutorado), 2009.
- MORGENTHAL, G; EICK, F, J; RAU, S; TARABEN, J. Wireless Sensor Networks Composed of Standard Microcomputers and Smartphones for Applications in Structural Health Monitoring, *Sensors*, v. 19, p. 1-22, 2019. Disponível em: < <http://doi.org/10.3390/s19092070> >
- OLIVEIRA, L, B, C; GRECO, M; BITTENCOURT, B, T. Analysis of the brazilian federal bridge inventory, *IBRACON Structures and Materials Journal*, v. 13, p. 1-13, 2019. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952019000100002> >
- RAWLINS, J. C. Basic AC Circuits, Elsevier Inc., ed. 2, 2000. ISBN 978-0-7506-7173-6 Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7173> >
- RIBEIRO, R, R; LAMEIRAS, M, R. Evaluation of low-cost MEMS accelerometers for SHM: frequency and damping identification of civil structures, *Latin American Journal os Solids and Structures*, v. 16, p 1-24, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/1679-78255308> >
- RODRIGUES, S, F, J; CASAS, R, J; ALMEIDA, O, A, P. Fatigue-safety assessment of reinforced concrete (RC) bridges: application to the Brazilian highway network, *Structure and Infrastructure Engineering*, p.601-616, 2013. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2011.598939> >
- STANČIN, S; TOMAŽIČ, S. Time- and Computation-Efficient Calibration of MEMS 3D Accelerometers and Gyroscopes, *Sensors*, p. 14884-14915, v. 14, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.3390/s140814885> >
- THOMPSON, M. Intuitive Analog Circuit Design, 2. ed, Newnes, 722 pag., 2013. ISBN 0124058663
- WENZEL, H. Health monitoring of bridges. Ed. 1, United Kingdom, John Wiley & Sons, Ltd, 2009. ISBN: 9780470031735