

Obtenção do Índice de Dano Através da Variação da Frequência Natural em Viadutos de Concreto Armado

Jorge Dalmas Braido¹,
Zacarias Martin Chamberlain Pravia²

Resumo

Conhecidas as limitações da inspeção visual de pontes e a consequente influência sobre a nota final da estrutura, apresenta-se neste trabalho uma forma de classificação de dano adicional, que considera a variação da frequência natural fundamental de flexão. Para isto, utilizam-se um *smartphone* com acelerômetro, modelagem numérica de dois viadutos em concreto armado. A definição das frequências naturais é realizada a partir do método modal *SSI-COV*, que é um dos métodos do *Stochastic Subspace Identification – SSI*. Os resultados obtidos indicam que o método aplicado pode ser utilizado para auxiliar na classificação dos danos e definir as estruturas que merecem prioridade de manutenção.

Palavras-chave: frequência natural, acelerômetro, *smartphone*, índice de dano, *SSI*.

Introdução

Segundos Mendes (2009), de caráter fundamental, a inspeção visual é subjetiva, o que resulta em variações na avaliação final de pontes. Para minimizá-la, o uso de métodos que forneçam dados quantitativos é uma alternativa que auxilia na classificação da condição das Obras de Arte Especiais (OAE). Neste contexto, o *smartphone* tem se mostrado hábil para a extração de dados do comportamento devido aos sensores que o equipam.

Segundo Matarazzo *et al.* (2017), o uso de *smartphones* pode detectar insuficiências estruturais com maior rapidez, economia e popularizar o monitoramento para uso profissional. Além disso, devido à natureza competitiva do mercado, a variedade e precisão destes sensores tendem a aumentar consideravelmente em cada novo modelo.

O uso de acelerômetros MEMS – que equipam *smartphones* – em atividades de monitoramento e que fornecem dados do comportamento estrutural pode ser visualizado em Khan *et al.* (2012); Ding *et al.* (2016); Castellanos-Toro *et al.* (2018); Kromanis (2020); Matarazzo *et al.* (2020) e; Figueiredo *et al.* (2022).

Porém, como estes equipamentos não foram criados para o monitoramento, também existem correções a serem realizadas para a aplicação. Segundo Feldbusch, Sadegh-Azar e Agne (2017), os sensores de *smartphones* apresentam resultados de baixa qualidade

em uma faixa de frequência de 0,5 Hz, o que indica a necessidade de uso de um filtro passa alta de primeira ordem. Esta correção também é vista em Ribeiro e Lameiras (2019), que constatam a necessidade de utilizar um filtro passa-alta de 1 Hz para eliminar a influência de baixas frequências.

Outro ajuste necessário é a calibração. O método apresentado por Stančin e Tomažič (2014) pode ser utilizado para corrigir as leituras do acelerômetro e do giroscópio após os ensaios. É aplicado com a adoção de seis posições diferentes, com o *smartphone* em repouso e com o auxílio de peças para garantir os alinhamentos necessários.

Como método de análise modal, o conhecimento dos parâmetros de vibração que descrevem a estrutura é realizado através do *Stochastic Subspace Identification – SSI*. Segundo Wenzel e Pichler (2005), este método é considerado robusto, capaz de cancelar o ruído e utiliza apenas dados de saída em domínio do tempo. De acordo com Chen, Beskhyroun, Omenzetter (2015), é também indicado para ensaios dinâmicos com fonte de excitação de baixa magnitude. Pode ser aplicado através de duas formas: *SSI-COV* e *SSI-DATA*.

O *SSI-DATA* e o *SSI-COV* diferem em termos de operação de dados. O *SSI-COV* exige que funções de covariância sejam primeiramente estimadas através de históricos de tempo para posteriormente realizar a definição dos parâmetros modais. Por outro lado, o *SSI-DATA* opera diretamente na resposta de saída.

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

² Professor no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGEng) da UPF/zacarias@upf.br

Segundo Kvåle, Øiseth e Rønquist (2017), o método *SSI-COV* é mais promissor (Chauhan, 2016).

Tanto *SSI-COV*, quanto *SSI-DATA* fornecem um gráfico conhecido como diagrama de estabilização, o qual permite identificar as frequências de um sistema. No diagrama de estabilização, as frequências se apresentam no eixo horizontal e a ordem do modelo no eixo vertical. Os modos são identificados na mesma frequência com ordens mais altas e formam uma linha vertical de polos estáveis (CHEN, BESKHYROUN e OMENZETTER, 2015).

Além da etapa experimental, é fundamental o uso de modelos numéricos. Neste caso, são importantes para a definição das frequências naturais, já que este parâmetro geralmente não é conhecido para pontes em bom estado ou no início da vida útil (CASAS e MOUGHTY, 2017).

Na modelagem, é comum considerar que as pontes estão simplesmente apoiadas sobre os pilares. Entretanto, dependendo do controle de qualidade da construção ou da ausência de neoprene, a ponte pode apresentar uma restrição à rotação nos suportes, o que afeta o comportamento dinâmico (CONSUEGRA e SANTOS, 2015).

A localização dos sensores na estrutura pode variar de acordo com a necessidade de se obter um modo de vibração específico para a análise. Segundo Gatti (2019), sensores instalados na metade do vão são utilizados para avaliar o primeiro modo de vibração, enquanto aqueles localizados a 1/4 e 1/3 do comprimento avaliam o segundo e terceiro modos, respectivamente.

Para obter um outro indicador de dano a partir de dados do comportamento, têm-se o índice de dano *DI*. Este método utiliza a relação entre a primeira frequência

natural de flexão – determinada experimentalmente – e aquela que corresponde ao mesmo modo, quando a ponte estava em bom estado – determinada com auxílio do modelo numérico. Neste caso, vale destacar que o modo fundamental de vibração de uma ponte é de flexão e este modo é normalmente excitado pelo tráfego de veículos (AKBARI, MAADANI e MAALEK, 2018; Casas e Rodrigues, 2015; Rahmatalla *et al.*, 2014). Este trabalho utiliza dez amostras de um conjunto de ensaios finalizados em 2021. O objetivo deste estudo é definir a existência de danos a partir do índice *DI* que considera a variação da frequência de flexão. É realizado através da extração de dados com um acelerômetro de *smartphone*.

As frequências naturais experimentais foram obtidas graças ao uso do módulo CESSIPy, criado por Carini (2021), em linguagem Python. Este é um módulo gratuito para a estimativa dos parâmetros modais através de dados de saída, o qual está armazenado no GitHub® e foi utilizado graças ao uso do *software Spyder*. O método de análise modal foi o *SSI-COV*.

Os estudos de caso são dois viadutos em concreto armado localizados em Passo Fundo/RS. Embora a calibração seja aplicada aos dados extraídos pelo *smartphone*, o procedimento não aparece neste trabalho.

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. A Figura 1 apresenta em

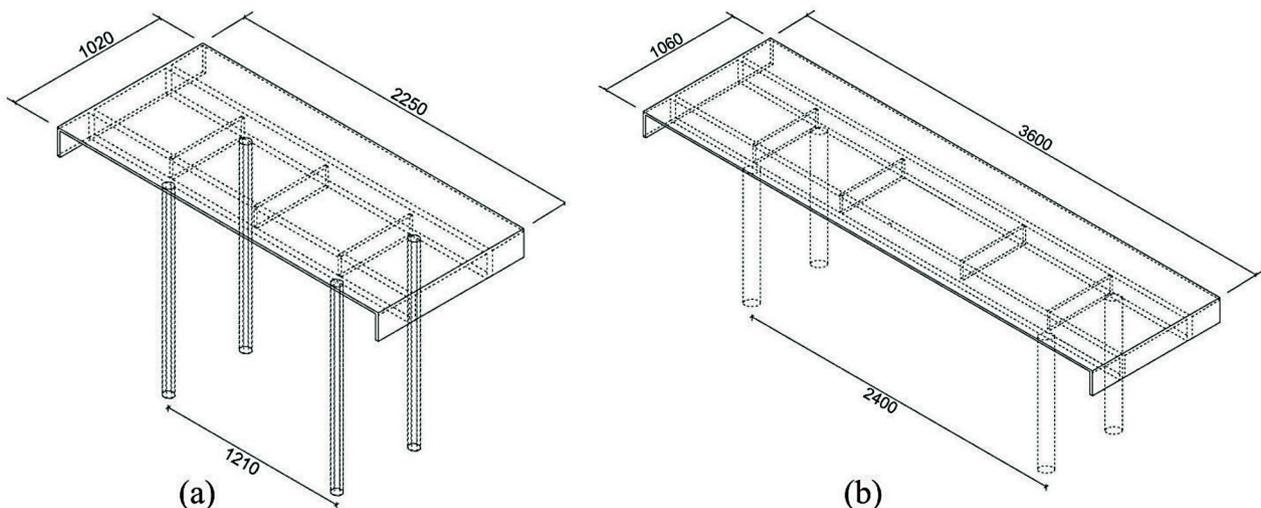


Figura 1 – Viadutos V1 (a), V2 (b).

(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, um computador e duas peças em nylon para calibração. 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 foram elaborados os modelos em elementos finitos e o processamento das amostras de aceleração. Os softwares utilizados foram o *ANSYS Mechanical APDL 2024 R1* – versão estudantil para a criação dos modelos virtuais dos estudos de caso; o *Excel*, o *Scilab* e o *Spyder* para o processamento do módulo CESSIPy.

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. A fonte de excitação utilizada foi o tráfego de veículos pesados sobre a estrutura em condições normais de trânsito.

O início e fim do salvamento de dados foi manual, realizado pelo operador do aparelho.

As amostras têm cinco minutos. O tempo mínimo necessário para o processamento através do módulo CESSIPy é de dois minutos. Além disso, a definição do tempo de duração da amostra não obedeceu nenhuma norma. Foram extraídas cinco amostras em cada viaduto, totalizando dez amostras.

Processamento de Dados

Os dados extraídos passavam por etapas de seleção, através do *Excel*, e preparação, através do *Scilab*. Nestas etapas, eliminavam-se as acelerações com origem na operação do aparelho pelo toque do operador na tela do celular, aplicava-se a calibração – de acordo com o método de Stančín e Tomažič (2014) – e o filtro Butterworth, com frequências passa-alta de 1 Hz e ordem igual a 1.

Na etapa experimental, as frequências eram conhecidas por meio do *software Spyder*, pelo módulo CESSIPy. O método *SSI-COV* foi utilizado com configuração padrão. O resultado era conhecido por um gráfico de estabilização e uma tabela que continha os valores das frequências naturais e taxas de amortecimento, este último parâmetro não foi utilizado.

Modelo Numérico

Os viadutos foram representados como modelos de cascas em 3D com malha quadrada de dimensões 15 cm x 15 cm. O acesso as formas modais resultantes ocorreu através da interface do usuário na etapa de pós-processamento.

Nas condições de contorno foram impedidos os deslocamentos em X, Y e Z sobre os pilares e foram adicionadas restrições laterais nas extremidades inferiores da primeira e última transversinas. Os modelos foram criados com o elemento SHELL181, o qual é adequado para a análise de estruturas em cascas com espessura fina à moderada. É um elemento com 4 nós e com 6 graus de liberdade em cada nó: translação em X, Y, e Z e; rotações em torno X, Y e Z. Além disso, o uso deste elemento evita o surgimento de modos espúrios (ANSYS, 2013).

Foram consideradas as massas de guarda-corpos, guarda-rodas, pavimento, elementos estruturais e o volume total das superestruturas. Para o viaduto V1, o módulo de elasticidade adotado foi de 28 GPa. Para V2, o módulo de elasticidade foi de 25 GPa. O coeficiente de Poisson adotado foi igual a 0,2.

Definição do Índice de Danos DI

A definição dos danos ocorreu através da equação (1) que apresenta o índice de dano *DI* e considera as frequências experimental e numérica (CASAS e RODRIGUES, 2015):

$$DI = 1 - \left(\frac{f_{atual}}{f_{ref}} \right)^2 \quad (1)$$

onde

DI – índice de dano da estrutura;

f_{atual} – frequência natural do primeiro modo de flexão identificadas nos ensaios dinâmicos, em Hz;

f_{ref} – frequência natural de flexão, em Hz, estimada quando a ponte estava em bom estado e que tem origem nos modelos numéricos.

Ao adotar este procedimento é sabido que a frequência de referência f_{ref} pode não apresentar boa precisão, o que resulta em valores inadequados, com

DI negativo. Porém, para pontes sem qualquer dano e em boa condição, valores negativos são esperados.

Viaduto V1

Os resultados obtidos para V1 são apresentados na Tabela 1. O uso do *SSI-COV* indicou frequências naturais que variam de 11,42 Hz a 12,36 Hz, que foram utilizadas para definir o índice de dano *DI*. No

diagrama de estabilização também é possível identificar a existência de frequências naturais próximas a 18 Hz e 33 Hz. A Figura 2 mostra o diagrama de estabilização de uma das amostras. O modelo em elementos finitos indicou uma frequência natural de flexão de 12,02 Hz. Assim, o índice de dano *DI* apresentou, em sua grande maioria, valores negativos e que permitem concluir que o viaduto V1 não apresenta problemas ou está em boas condições estruturais. A Figura 3 apresenta o modo de flexão numérico obtido para V1.

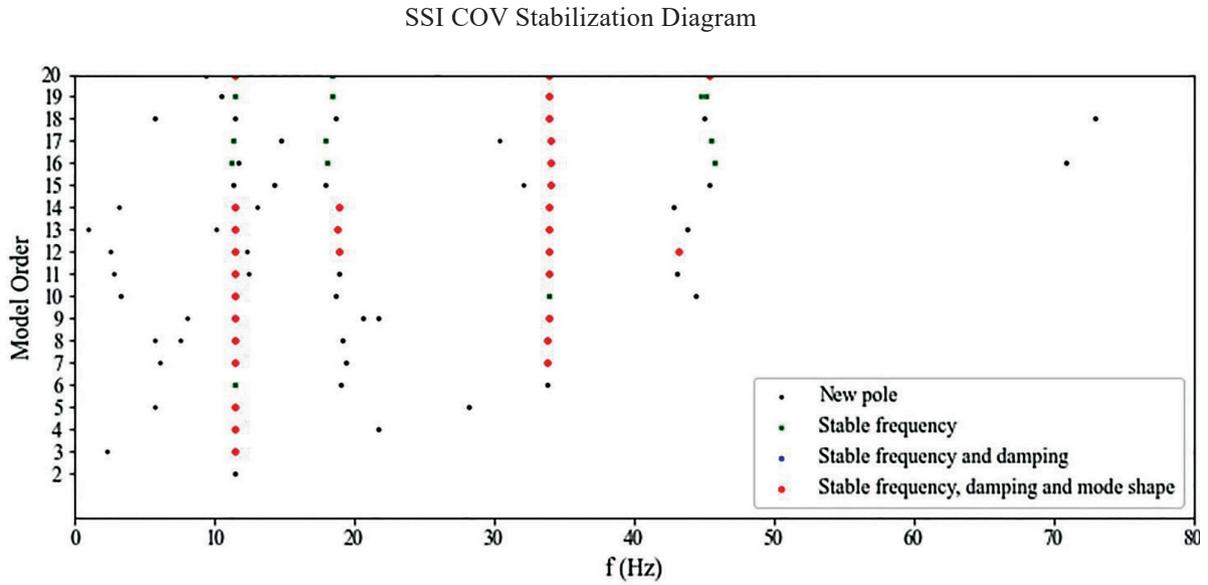


Figura 2 – V1: Diagrama de estabilização da amostra 1.



Figura 3 – Modo de flexão.

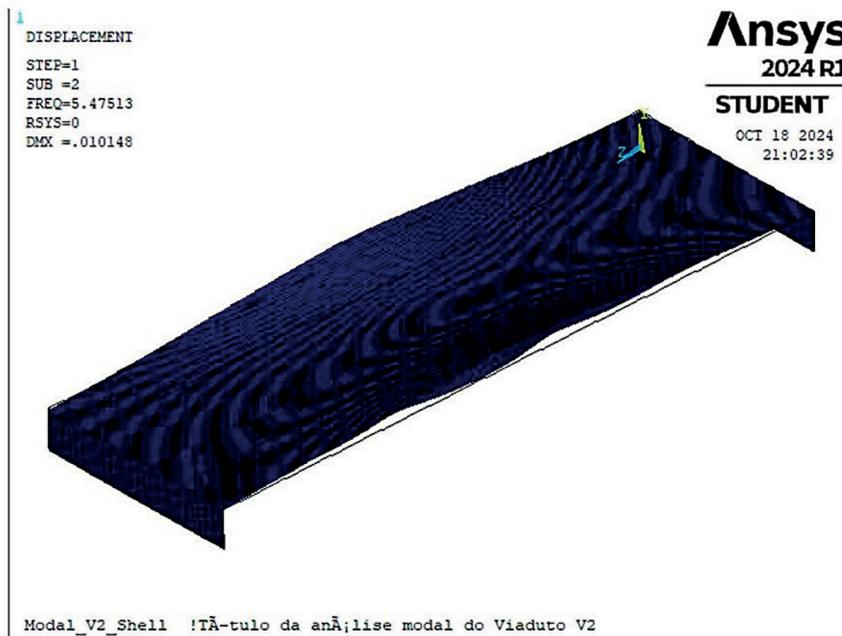
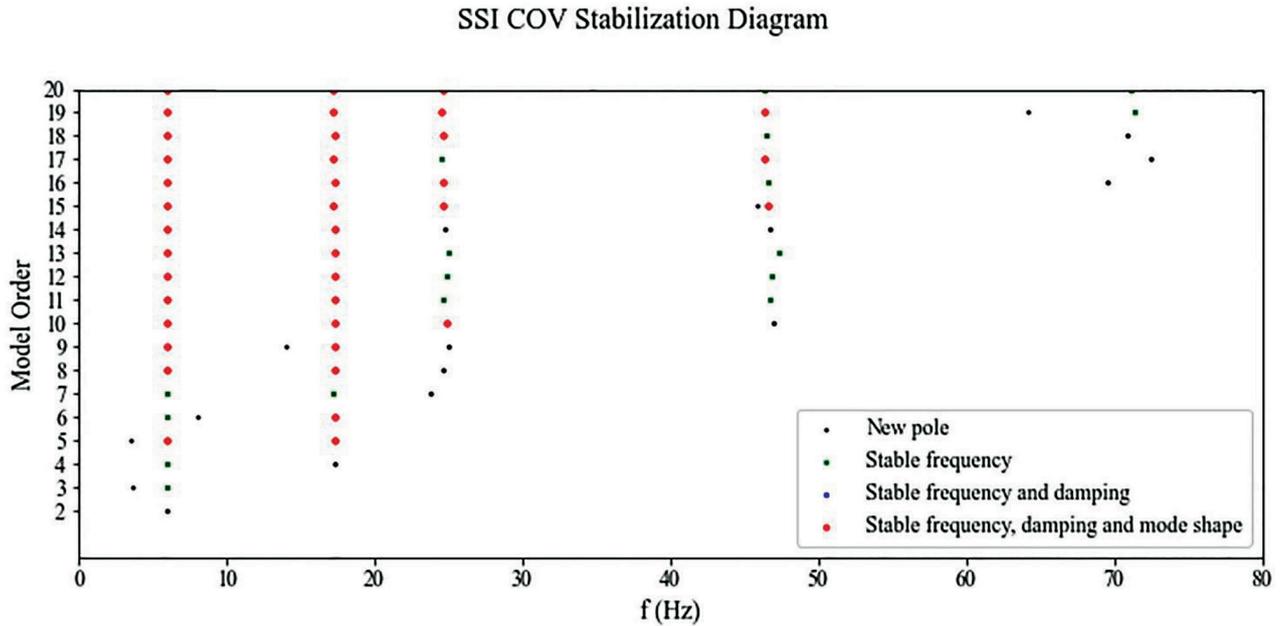
Tabela 1 – V1: índice de dano DI

Amostra	f_{atual} (Hz)	DI
1	11,42	0,097
2	12,04	-0,003
3	12,18	-0,027
4	12,36	-0,057
5	11,99	0,005

Viaduto V2

Os resultados obtidos para V2 são apresentados na Tabela 2. O uso do SSI-COV indicou frequências naturais experimentais que variam de 5,05 Hz a 6,12 Hz utilizadas para definir DI. Além destas, nos diagramas de estabilização é possível identificar frequências próximas a 16 Hz e 25 Hz. A Figura 4 mostra o diagrama de estabilização de uma das amostras extraídas em V2.

Na Figura 5, o modelo numérico indicou uma



frequência natural de flexão igual a 5,47 Hz. Assim, o índice de dano DI gerou valores positivos e negativos. Quando comparados, os valores positivos apresentam maior magnitude que em relação a V1.

Segundo Kim (2005) apud Park *et al.* (1987), Stone e Taylor (1993) e Williams *et al.* (1997), índices de danos maiores que 0,1 e menores que 0,39 indicam danos que podem ser reparados.

Tabela 2 – V2: índice de dano DI.

Amostra	f_{atual} (Hz)	DI
6	5,13	0,120
7	5,05	0,148
8	5,81	-0,128
9	6,12	-0,252
10	5,95	-0,183

Conclusões

Este trabalho apresenta um método para classificar os danos a partir da variação das frequências naturais associadas ao modo de flexão de dois viadutos. A aplicação fez uso de um smartphone para a extração de amostras. Os dados extraídos passam por um filtro Butterworth passa-alta e calibração para minimizar a influência do uso deste dispositivo sobre as amostras capturadas. O módulo CESSIPy permitiu o uso de um método robusto de análise modal de forma gratuita.

Em relação aos resultados obtidos, é possível constatar que os viadutos apresentam valores positivos e negativos. O viaduto V1 encontra-se em bom estado de conservação pois tem índices de dano negativos ou valores positivos muito baixos. Em relação a V2, enquanto os índices negativos também indicam que este viaduto está em bom estado, os índices positivos indicam a existência de danos reparáveis e, portanto, este deveria receber maior atenção em relação a V1, em caso de necessidade de manutenção.

Embora tenham sido adotados o local de extração e a fonte de excitação que tem a capacidade de excitar modos de flexão, é necessário indicar fragilidades. O uso de apenas um acelerômetro não permite o conhecimento de formas modais experimentais. Assim, as frequências naturais experimentais foram adotadas como de flexão, mesmo sem a verificação deste modo.

Os modelos numéricos foram criados com vínculos simplesmente apoiados, como recomenda a literatura, ou seja, as condições de vínculos reais não são conhecidas. Além disso, não foram abordados temas referentes à qualidade dos modelos numéricos.

Por fim, o uso do método de dano DI não deve

ser realizado de forma exclusiva. É importante ressaltar que o uso de métodos de classificação da condição de forma isolada dificultam a avaliação final. Embora subjetiva, o uso de registros fotográficos com origem na inspeção visual poderiam colaborar na definição da ocorrência de danos junto ao método aplicado neste trabalho.

Referências

- AKBARI, R; MAADANI, S; MAALEK, S. On the fundamental natural frequency of bridge decks: review and applications, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings, p. 1-15, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1680/jstbu.17.00102>> ANSYS, Inc. ANSYS Mechanical APDL Element Reference, Southpointe, SAS IP, Inc, 2013.
- CARINI, R, M. Identificação das Propriedades Dinâmicas de Estruturas submetidas a Ações Ambientais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, (Tese de doutorado), Porto Alegre, Brasil, 2021.
- 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>>
- CASAS, R, J; RODRIGUES, F. Bridge Condition and Safety Based on Measured Vibration Level. In: IABSE Workshop: Safety, Robustness and Condition Assessments of Structures, Helsinki, Finland, 2015.
- 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>>
- CHAUHAN, S. Subspace Algorithms in Modal Parameter Estimation for Operational Modal Analysis: Perspectives and Practices, In: Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, 295-301, 2016. doi:10.1007/978-3-319-30084-9_27.
- CHEN, W, G; BESKHYROUN, S; OMENZETTER, P. A comparison of operational modal parameter identification methods for a multi-span concrete motorway bridge, In: New Zealand Society for Earthquake Engineering – NZSEE, Rotorua, 2015.
- CHEN, W; DUAN, L. Bridge engineering handbook: fundamentals, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 2014. ISBN-13: 978-1-4398-5234-7.

- CONSUEGRA, A, F; SANTOS, C. Vibration analyses for the local and global evaluation of bridges as a tool for structural retrofit, *Journal of Construction*, v. 14, p. 16-22, 2015.
- DING, Y; HAN, R; LIU, H; LI, S; ZHAO, X; YU, Y. Bridge inspection and management system based on smartphone. In: *Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems – SMASIS*, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1115/SMASIS2016-9067>>
- 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>>
- FIGUEIREDO, E; MOLDOVAN, I; ALVES, P; REBELO, H; SOUZA, L. Smartphone Application for Structural Health Monitoring of Bridges, *Sensors*, v. 22, p.1 -24, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s22218483>>
- GATTI, M. Structural health monitoring of an operational bridge: A case study, *Engineering Structures*, v. 195, p. 200-209, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.102>>
- KHAN, Z, W; XIANG, Y; AALSALEM, Y, M; ARSHAD, Q. Mobile Phone Sensing Systems: A Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 15, p. 1-26, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/SURV.2012.031412.00077>>
- KIM, H, T; LEE, M, K; K.-M. LEE; CHUNG, S, Y; SHIN, M, H. Seismic damage assessment of reinforced concrete bridge columns, *Engineering Structures*, v. 27, p. 576-592, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.11.016>
- KROMANIS, R. Health monitoring of bridges, in *PACHECO-TORGAL, F; RASMUSSEN, E; GRANQVIST, C; IVANOV, V; KAKLAUSKAS, A; MAKONIN, S. Start-Up Creation: the Smart Eco-Efficient Built Environment*, 2^a ed., Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, p. 369-389, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12819946-6.00014-X>>
- KVÅLE, A, K; ØISETH, O; RØNNQUIST, A. Operational modal analysis of an end-supported pontoon bridge, *Engineering Structures* v. 148, p. 410-423, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.069>>
- 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.
- MATARAZZO, T; VAZIFEH, V; PAKZAD, S; SANTI, P; RATTI, C. Smartphone data streams for bridge health monitoring. In: *International Conference on Structural Dynamics – EURO DYN*, 10th, 2017, Itália.
- 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.
- RAHMATALLA, S; HUDSON, K; LIU, Y; EUN, C. Finite element modal analysis and vibration wave forms in health inspection of old bridges, *Finite Elements in Analysis and Design*, p. 40-46, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.finel.2013.09.006>>
- RIBEIRO, R, R; LAMEIRAS, M, R. Evaluation of low-cost MEMS accelerometers for SHM: frequency and damping identification of civil structures, *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 16, p 1-24, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1679-78255308>>
- 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>>
- WENZEL, H; PICHLER, D. *Ambient vibration monitoring*, ed. 1, John Wiley & Sons Ltd: England, 2005. ISBN-10 0-470-02430-5.