

## OBTENÇÃO DO ÍNDICE DE DANO ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA NATURAL EM VIADUTOS DE CONCRETO ARMADO

Jorge Dalmas Braido<sup>1</sup>, Zacarias Martin Chamberlain Pravia

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

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

### Resumo

Conhecidas as limitações da inspeção visual de pontes e a conseqüente 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 minimiza-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 constata 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 através

da 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. Segundo Kvåle, Øiseth e Rønnquist (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, pode-se utilizar 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*.

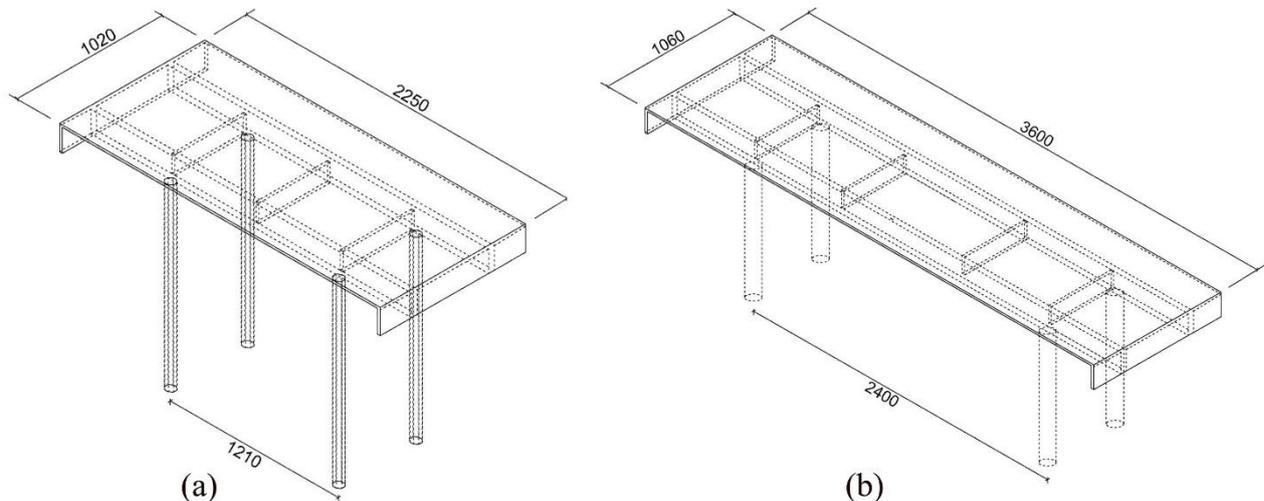
As frequências naturais experimentais foram obtidas graças ao uso do módulo CESSIPy, criado por Carini (2021), em linguagem Python. Este é um módulo gratuito para a estimativa dos parâmetros modais através de dados de saída, o qual está armazenado no GitHub® e foi utilizado graças ao uso do *software 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 (a) o viaduto V1 e em (b) o viaduto V2 onde é possível identificar as dimensões em centímetros.



**Figura 1 - Viadutos V1 (a) e V2 (b)**

### 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/s<sup>2</sup> 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 possuem 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 através do *software Spyder*, pelo módulo CESSIPy. O método *SSI-COV* foi utilizado com configuração padrão. O resultado era conhecido através de 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 15x15 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* é o índice de dano da estrutura;

$f_{atual}$  é a frequência natural do primeiro modo de flexão identificadas nos ensaios dinâmicos, em Hz;  
 $f_{ref}$  é a 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.

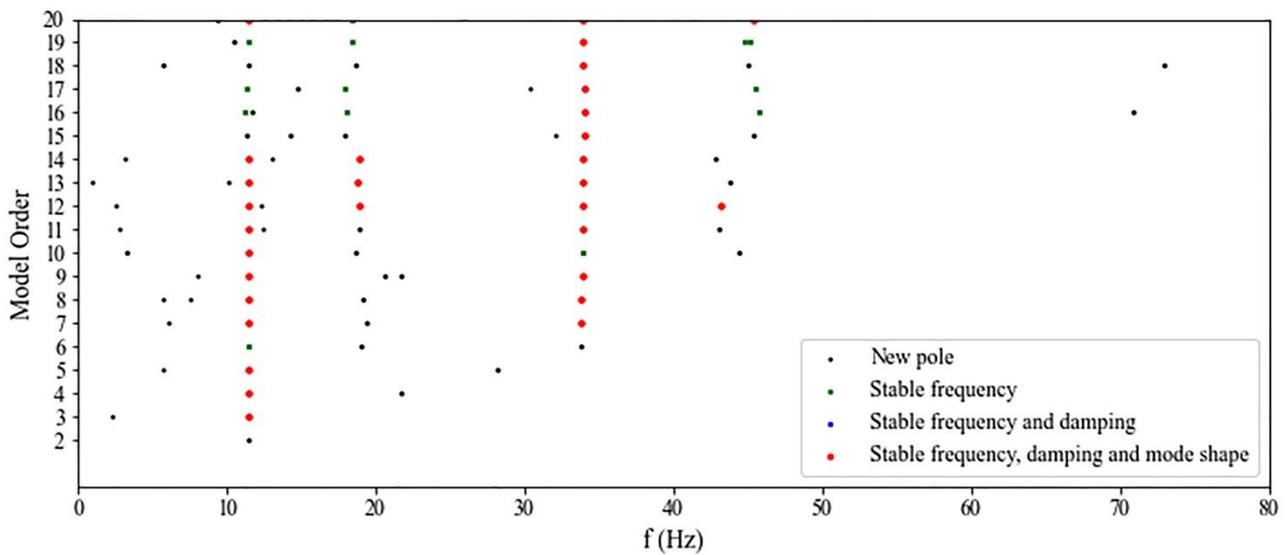
O modelo em elementos finitos indicou uma frequência natural de flexão de 12,02 Hz. Assim, o índice de dano *DI* apresentou, em sua grande maioria, valores negativos e que permitem concluir que o

viaduto V1 não apresenta problemas ou está em boas condições estruturais. A Figura 3 apresenta o modo de flexão numérico obtido para V1.

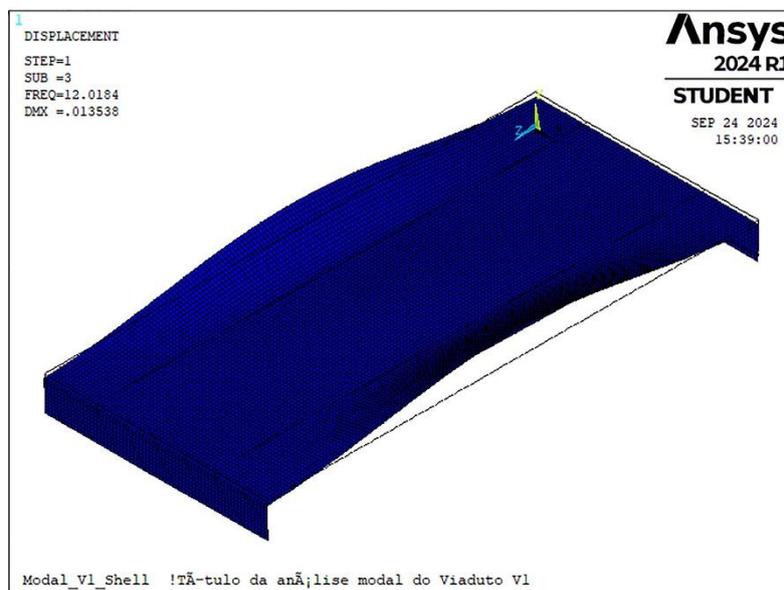
**Tabela 1 - V1: índice de dano DI**

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

SSI COV Stabilization Diagram



**Figura 2 - V1:diagrama de estabilização da amostra 1**



**Figura 3: V1 - modo de flexão**

## 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.

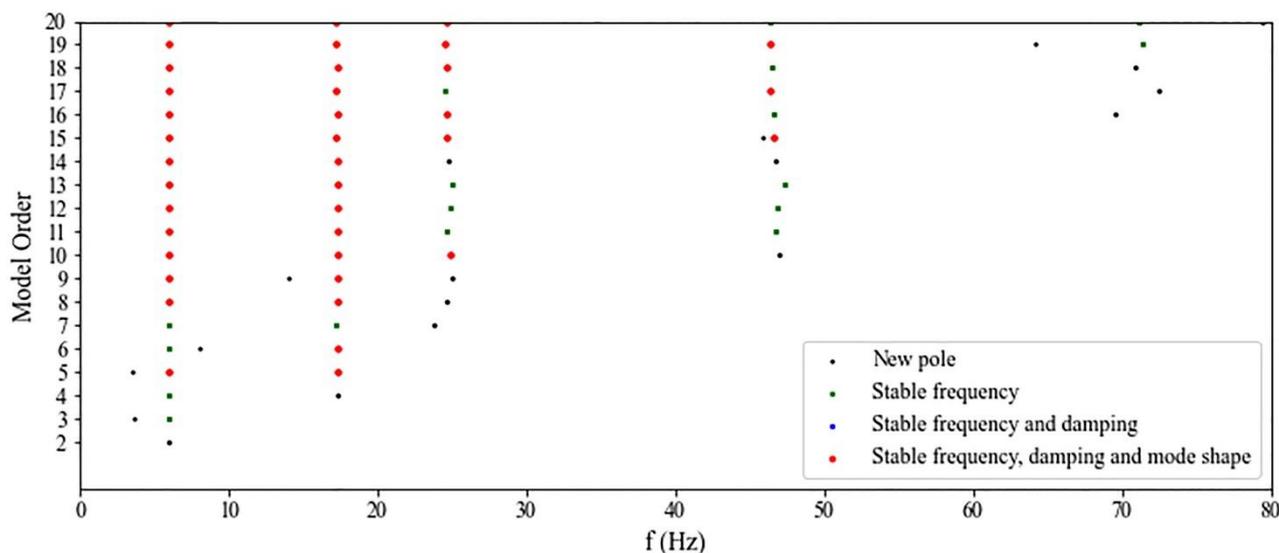
Na Figura 5, o modelo numérico indicou uma frequência natural de flexão igual a 5,47 Hz. Assim, o índice de dano *DI* gerou valores positivos e negativos. Quando comparados, os valores positivos apresentam maior magnitude que em relação a V1.

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.

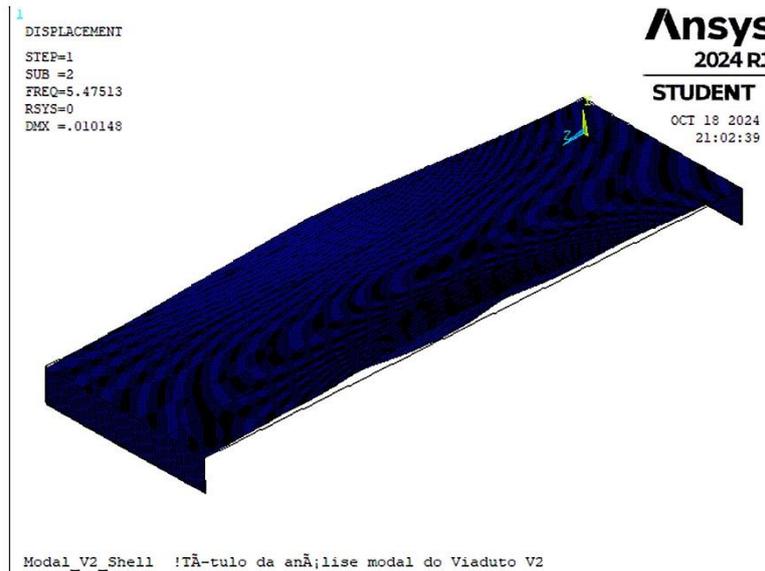
**Tabela 2 - V2:índice de dano DI**

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

SSI COV Stabilization Diagram



**Figura 4 - V2:diagrama de estabilização da amostra 9**



**Figura 5: V2 - modo de flexão**

## 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 possui 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 ed., Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, p. 369-389, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819946-6.00014-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 - EUROODYN*, 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 ISBN-10 0-470-02430-5