

A model-based damage detection approach using genetic algorithm optimization

Vinicius N. Alves¹, Matheus M. de Oliveira¹, Diogo Ribeiro², Rui Calçada³, Alexandre Cury⁴

¹*Dept. of Civil Engineering, Federal University of Ouro Preto, Ouro Preto, Brazil.*
vinicius.alves@ufop.edu.br, matheusmoliveira4@gmail.com

²*CONSTRUCT-LESE, School of Engineering, Polytechnic of Porto, Porto, Portugal.*
drr@isep.ipp.pt

³*CONSTRUCT-LESE, Faculty of Engineering, University of Porto, Porto, Portugal.*
ruiabc@fe.up.pt

⁴*Dept. of Civil Engineering, Federal University of Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brazil.*
alexandre.cury@ufjf.edu.br

Abstract. The identification of structural damages based on numerical model updating has been of increasing interest in several areas of engineering, and basically consists on an optimization process relying on the minimization of the residuals between the measured and estimated numerical responses. Most of the existing studies using this methodology are applied to simple structures such as beams, frames and trusses, existing a scarce of studies applied to large and complex structures. In this context, this article aims to evaluate the performance of this methodology using genetic algorithms with application to a case study of a real railway bridge, to assess its performance when applied to complex and large-scale structures. The results obtained proved the reliability of the proposed methodology in detecting, locating and quantify multiple damages, with a considerable number of updating parameters and scarce number of target responses.

Keywords: railway bridges, damage identification, modal parameters, model updating, genetic algorithm.

1 Introdução

Atualmente muitas estruturas se encontram ou em breve se encontrarão no fim de seus ciclos de vida útil estimados em projeto, dada a deterioração sofrida ao longo do tempo e/ou a eventos extremos inesperados tais como sismos, explosões, entre outros [1]. Uma vez que a substituição dessas estruturas é inviável economicamente, diversas técnicas de identificação de danos estão sendo desenvolvidas para que a vida útil dessas estruturas seja estendida com segurança. Tais técnicas visam identificar o dano o mais cedo possível, em um esforço de evitar grandes consequências de ordem social, ambiental e econômica.

A maioria das técnicas de identificação de danos estruturais são baseadas em dados vibracionais. Uma vez que alterações em um sistema estrutural causadas por danos se manifestam como alterações nas características de massa, rigidez e dissipação de energia do sistema, o dano pode ser identificado através de alterações nas características das respostas dinâmicas da estrutura [2].

Os processos de identificação de danos estruturais podem ser classificados em cinco níveis de acordo com as informações obtidas a respeito do dano: nível 1 – detecção de dano; nível 2 – localização do dano; nível 3 – classificação do dano; nível 4 – quantificação do dano; e nível 5 – previsão da vida residual [3]. Em geral, duas diferentes abordagens podem ser adotadas para o processo de identificação de danos estruturais. A primeira é a abordagem baseada em dados experimentais (*data-based approach*) e a segunda a abordagem baseada em modelos analíticos ou numéricos (*inverse problem* ou *model-based approach*), sendo que a abordagem escolhida para avaliação de danos estruturais tem influência significativa na precisão do seu diagnóstico.

A abordagem baseada em modelos (*model-based approach*), que tem tido crescente interesse ao longo da última década, consiste geralmente em um processo de atualização de modelos numéricos em elementos finitos no

qual parâmetros de um modelo inicial de uma estrutura intacta é alterado para alcançar uma boa concordância com a estrutura real analisada, possivelmente danificada. Uma vez alcançada essa concordância, é possível a obtenção de informações acerca da localização e severidade do dano. A busca dessa concordância consiste num processo de minimização entre as respostas dinâmicas medidas da estrutura em utilização e as respostas dinâmicas obtidas por meio do seu respectivo modelo de elementos finitos, o que é descrito como um problema de otimização [2].

Estudos avaliando a eficiência das metodologias baseadas na atualização de modelos numéricos em elementos finitos foram realizados por diferentes autores em várias aplicações, tais como: vigas [4,5], pórticos [6,7], treliças [8,9] e placas [10,11].

A maioria das pesquisas existentes que utilizam modelos numéricos são aplicadas em estruturas relativamente simples, sendo a sua aplicação em estudos que consideram estruturas de grande porte, relativamente limitados [12]. A identificação de danos estruturais em estruturas de grande porte apresenta enormes dificuldades associadas ao elevado número de graus de liberdade, ao grande número de nós e elementos que são utilizados, além disso pequenos danos em elementos estruturais específicos têm pouca influência nas respostas dinâmicas globais da estrutura.

Nesse contexto, esse artigo tem como objetivo avaliar a eficiência e robustez de uma metodologia baseada na atualização de modelos numéricos, utilizando algoritmos genéticos para identificar diferentes cenários de danos numa estrutura de elevada complexidade estrutural, nomeadamente a ponte ferroviária de São Lourenço.

2 Metodologia de identificação de danos

A estratégia de identificação de danos proposta baseia-se na comparação das respostas modais do modelo numérico com seu respectivo modelo com dano utilizado como referência. Esta estratégia é realizada minimizando uma função objetivo definida por um ou vários indicadores de danos com base nas respostas modais/dinâmicas sensíveis a alterações estruturais. Um fluxograma ilustra a implementação computacional da metodologia de identificação de danos, que foi desenvolvida usando os softwares comerciais MATLAB [13] e ANSYS [14] (Fig. 1). Os algoritmos genéticos, técnica escolhida para realizar o processo de minimização adotado nessa metodologia, têm vantagens reconhecidas, tais como: a não dependência do ponto de partida inicial, capacidade de gerenciar um grande número de parâmetros e restrições, possibilidade de lidar com variáveis discretas e binárias, e a capacidade de encontrar o mínimo global em funções com vários mínimos locais [15].

Neste estudo, o cenário de dano é simulado artificialmente. Para isso, parâmetros de referência são utilizados para simular o cenário de dano antes do início do processo de minimização. Portanto, o modelo em elementos finitos para o cenário de danos é definido no software ANSYS, onde é realizada uma análise modal e obtidos os indicadores de danos de referência (ID^{ref}). Após esta etapa, é realizado o processo de otimização. No processo iterativo, a primeira geração ($k=1$) é criada com base na geração aleatória de indivíduos que são candidatos a formar a população inicial usando o software MATLAB. Cada geração é formada por n indivíduos, em que cada indivíduo é uma possível solução para o problema de minimização. Cada indivíduo é formado j valores de parâmetros de atualização, responsáveis por realizar alterações nos modelos numéricos simulados na tentativa de encontrar um modelo que possua a melhor correspondência com o modelo de referência. Os indivíduos da geração $k+1$ são criados a partir de indivíduos da geração k , com base em operadores genéticos tais como seleção, cruzamento, mutação e substituição [16].

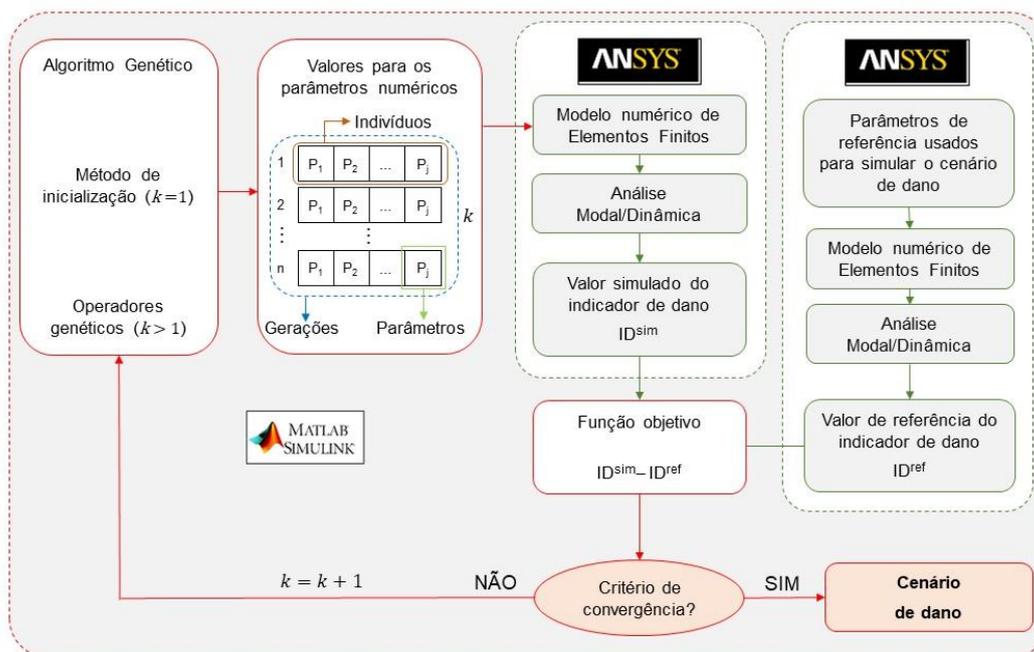


Figura 1. Fluxograma da metodologia de identificação de danos

A partir dos parâmetros numéricos definidos para cada indivíduo, o modelo numérico simulado é desenvolvido, e a análise modal é realizada para determinar os respectivos indicadores de danos (ID^{sim}). A identificação do dano termina quando um critério de parada é satisfeito. Normalmente, isso é alcançado limitando-se o número de gerações do AG ou especificando um critério de convergência, ou seja, quando o valor da função objetivo é menor do que uma tolerância predefinida. Assim, os parâmetros de atualização do indivíduo com menor valor da função objetivo representam o cenário de dano. Desta forma, o conjunto de parâmetros desse indivíduo com a menor função objetivo será responsável por indicar a posição e quantificação dos danos ao longo da estrutura. É importante destacar que, neste trabalho, o cenário de danos foi simulado artificialmente, no entanto, para casos de danos reais, esta etapa pode ser substituída pela inclusão de dados experimentais da estrutura analisada.

Um dos aspectos mais relevantes no processo de identificação de danos estruturais é a escolha das respostas dinâmicas adequadas que possam servir como indicadores de danos estruturais. Na atualização de modelo numéricos, um ou mais resíduos das respostas dinâmicas podem ser utilizados na definição da função objetivo do problema de otimização e que representa as diferenças entre a estrutura danificada e o modelo inicial intacto.

As frequências naturais variam em função das características de massa e rigidez do sistema, bem como das condições de contorno, o que possibilita a identificação de danos estruturais. Deve-se notar que as alterações nas frequências naturais têm limitações práticas em várias aplicações, principalmente no caso de grandes estruturas. Destaca-se que alterações detectáveis na frequência podem exigir altos níveis de dano, além disso, a baixa sensibilidade em relação ao dano requer medições muito precisas ou grandes níveis de dano.

Os modos de vibração fornecem informações espacialmente distribuídas sobre as características dinâmicas da estrutura e, portanto, são mais adequados para fornecer informações sobre a localização de danos do que as frequências [17], no entanto, uma de suas limitações é a necessidade da medição simultânea das vibrações ambientais em um número elevado de pontos, de modo a ser assegurada uma adequada resolução espacial, juntamente com o uso de técnicas de identificação modal mais refinadas.

Uma alternativa utilizada por diversos pesquisadores, é a formulação de uma função objetivo com dois ou mais indicadores de dano. A função objetivo utilizada com mais regularidade combina as frequências naturais e os modos de vibração [10,15,18–20].

Para o indicador de dano adotado nesse trabalho, a função objetivo (f) compreende dois termos, um relacionado aos resíduos das frequências naturais e outro relacionado aos resíduos das deformadas modais avaliadas por meio do parâmetro MAC [15]:

$$f = a \sum_{i=1}^N \left| \frac{f_i^{ref} - f_i^{sim}}{f_i^{ref}} \right| + b \sum_{i=1}^N |MAC(\varphi_i^{ref}, \varphi_i^{sim}) - 1| \quad (1)$$

em que f_i^{ref} e f_i^{sim} são os valores das frequências relacionados aos cenários de danos de referência e simulados para os modos i , φ_i^{ref} e φ_i^{sim} são as deformadas modais dos cenários de referência e simulado do modo i , N é o número de modos, e a e b são fatores de ponderação dos termos da função objetivo. Nesse estudo, N é igual a 5 e os termos a e b são ambos iguais a 1.

Em relação ao algoritmo genético, foi considerada uma população inicial composta por 30 indivíduos gerados aleatoriamente pelo método de Monte Carlo, considerando 300 gerações, totalizando 9000 indivíduos. O número de elites foi considerado igual a 1 e o número de substitutos também foi definido igual a 1. As taxas de cruzamento e mutação foram consideradas iguais a 50% e 15%, respectivamente. No caso de taxa de mutação, foi definida uma variável de desvio padrão ao longo da otimização, entre 0,10 e 0,01.

3 Ponte ferroviária de São Lourenço

A ponte ferroviária de São Lourenço é uma ponte do tipo “*bowstring*” (ponte em arco com tabuleiro inferior) situada na linha Norte da rede ferroviária de Portugal (Fig. 2a). A estrutura da ponte consiste em dois tabuleiros de concreto armado independentes com extensão igual a 42 m. Cada tabuleiro é constituído por uma laje inferior suspensa lateralmente por dois arcos metálicos através de pendurais e diagonais. As cargas do tabuleiro são transferidas para os encontros por meio de aparelhos de apoio, dois em cada extremidade da ponte, posicionados nos alinhamentos das vigas principais. Cada tabuleiro, com largura total de 7,35 m, é constituído por uma laje de concreto apoiada lateralmente por duas vigas principais, formando uma seção em U, e um passeio lateral. A via é formada por uma camada de lastro, dormentes monoblocos de concreto, sapatas e trilhos.

Um modelo em elementos finitos contendo o tabuleiro, arcos, pendurais, diagonais aparelhos de apoio e via é utilizado para aplicação da metodologia de identificação de danos. Este modelo foi desenvolvido anteriormente por Ribeiro et al. [15] no software ANSYS (Fig. 2b). A laje do tabuleiro foi modelada com elementos sólidos, os arcos, pendurais e diagonais foram modelados com elementos de barra e os aparelhos de apoio foram modelados utilizando um conjunto de elementos de molas.



Figura 2. Ponte ferroviária de São Lourenço: a) visão geral, b) modelo em elementos finitos

Para avaliação da metodologia de identificação de danos, quatro cenários de danos da estrutura da ponte foram simulados, nomeadamente: *i*) dano localizado em um trecho central do tabuleiro simulado através da redução do valor do módulo de elasticidade do concreto, *ii*) dano em um dos aparelhos de apoio simulado através do aumento da sua rigidez vertical, *iii*) dano em uma ligação entre o pendural e o tabuleiro simulado através da redução do módulo de elasticidade do elemento de ligação entre o pendural e o tabuleiro da ponte, e por último, *iv*) a ocorrência simultânea dos três cenários de danos anteriores. Os valores numéricos relativos ao cenário de referência e aos cenários de danos são apresentados na Tabela 1, e a localização dos danos simulados são apresentados na Figura 3. O dano do tabuleiro é simulado de forma gradual de modo a se tornar menos intenso à medida que se afasta da localização do elemento finito afetado. O dano é simulado reduzindo-se o valor do módulo de elasticidade do concreto do tabuleiro, de maneira que o elemento central, indicado pelas coordenadas x_1 e z_1 ,

apresenta 80% do valor do módulo de elasticidade do material, enquanto os elementos adjacentes (distribuídos concentricamente), apresentam respectivamente, 85% e 90%, representando uma área de 2,25 m² (Fig. 3b). Em relação ao dano no aparelho de apoio, o dano é introduzido em um dos quatro aparelhos de apoio (pos_1), e o dano na ligação entre pendural/diagonal é simulado em uma das 52 possíveis ligações (pos_2).

Tabela 1. Parâmetros do modelo numérico para diferentes cenários de dano da Ponte São Lourenço

Parâmetros	Unidade	Cenário de referência	Cenário de dano				AG	
			C1	C2	C3	C4	Limites (Inf/Sup)	
x_l	m	-	2,3	-	-	2,3	0/4,6	
Tabuleiro	z_l	m	-	20,63	-	-	20,63	0/42
	E_{bd}	GPa	38,1	30,5*	-	-	30,5*	190/400
Apoio	pos_1	-	-	2	-	2	1/4	
	K_v	N/m	5000	-	5500	-	5500	4500/9500
Pendural/Diagonal	pos_2	-	-	-	45	45	1/52	
	E_{sc}	GPa	210	-	-	189	189	100/210

*no elemento finito central

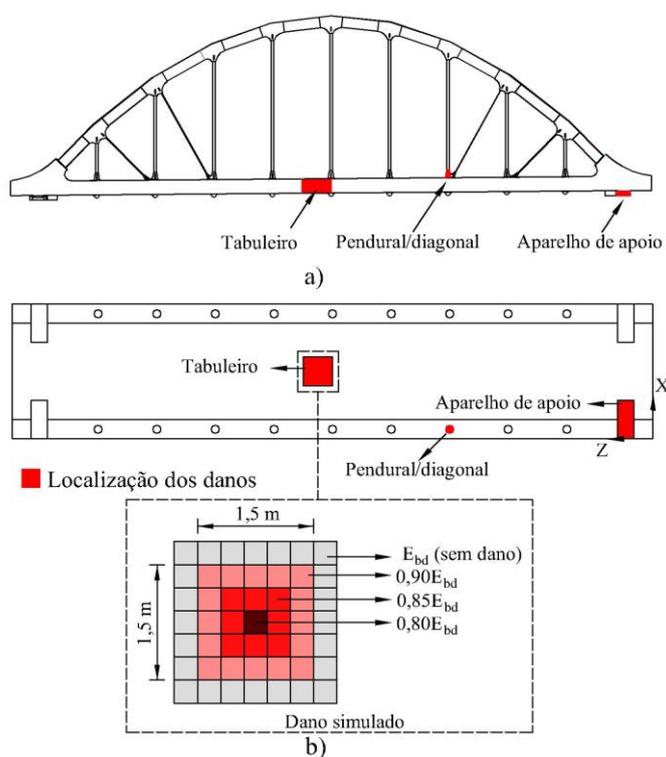


Figura 3. Localização dos danos na ponte de São Lourenço: a) vista lateral, b) vista superior e detalhe do dano localizado no tabuleiro

4 Identificação de dano

A Tabela 2 apresenta os erros relativos dos valores de estimativa do parâmetro, entre os cenários de dano simulado e o de referência, estimados através da Eq. (2) para os quatro cenários de dano. Nas situações em que é considerado um único dano (cenários C1, C2 e C3), o método proposto localizou o dano com sucesso, com um valor de erro de 0%. Para o cenário C4, em que os danos dos três primeiros cenários são considerados simultaneamente, foram encontrados erros na determinação da localização do dano na ligação entre o arco e o

tabuleiro, e também na avaliação do módulo de elasticidade, com um erro relativo de 5,4%. Na Figura 4 é possível observar a localização dos danos considerados para o cenário C4 e aqueles obtidos com a estratégia proposta.

É importante destacar que, dentre os cenários de dano considerados, o dano na ligação entre o arco e o tabuleiro é o que menos afeta o comportamento global da estrutura, o que justifica a maior dificuldade na identificação deste dano. As alterações nas frequências e modos de vibração causadas pelo dano na ligação entre o arco e o tabuleiro são menores do que aquelas causadas pelo dano no tabuleiro e no aparelho de apoio.

$$Erro (\%) = \left| \frac{X_{sim} - X_{ref}}{X_{ref}} \right| \times 100 \quad (2)$$

Tabela 2. Erros relativos na estimativa dos valores dos parâmetros na identificação de dano na ponte São Lourenço

Cenário de dano	Erro relativo (%)						
	x_1	z_1	E_{bd}	pos_1	K_v	pos_2	E_{sc}
C1	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
C2	-	-	0,0	0,0	-	-	-
C3	-	-	-	-	-	0,0	0,0
C4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,7	5,4

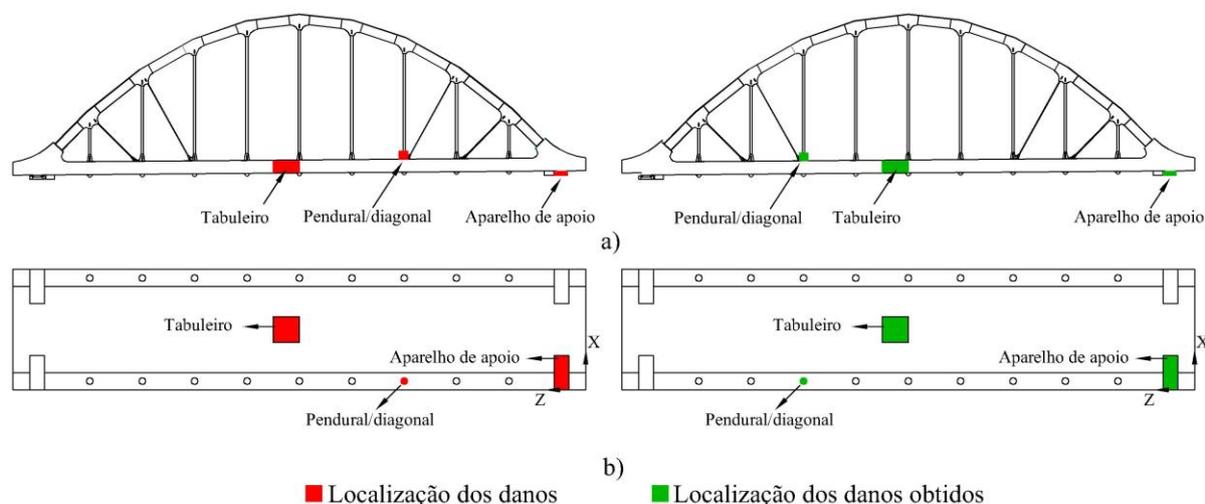


Figura 4. Localização do dano obtido no modelo da ponte de São Lourenço: a) vista lateral, b) vista superior

5 Conclusões

Este trabalho apresentou uma estratégia de identificação de danos baseada em atualização de modelo numéricos utilizando algoritmos genéticos para detectar e localizar danos. A metodologia proposta foi aplicada em uma estrutura real para avaliar sua eficiência em uma estrutura de grande porte.

O estudo baseou-se em um modelo numérico da ponte ferroviária de São Lourenço, onde quatro cenários de danos foram considerados: três cenários referentes a danos isolados, um dano local no tabuleiro da ponte, um mal funcionamento no aparelho de apoio e um dano na ligação entre o arco e o tabuleiro (cenários C1, C2 e C3), e todos esses danos simulados simultaneamente (cenário C4). Para essa avaliação foi utilizado um identificador relacionado as frequências naturais e deformadas modais e os resultados obtidos comprovaram a eficiência e robustez da metodologia para detectar com sucesso todos os danos e suas localizações, com exceção da ligação entre o arco e o tabuleiro no cenário C4. Todavia, para este último caso, o local do dano indicado pelo algoritmo estava em uma posição simétrica em relação ao dano de referência, possivelmente pelo fato de danos em posições simétricas da estrutura causarem o mesmo efeito na mudança das frequências dos modos de vibração simétricos.

Como trabalhos futuros, a metodologia de identificação de danos proposta também será aplicada para dados experimentais derivados de um Sistema de Monitoramento Estrutural (SHM). Para tanto, o cenário de dano de referência, que foi induzido artificialmente no modelo numérico, deve ser substituído por um cenário de dano

derivado de dados experimentais, e representando a condição real da estrutura real. A atualização regular de modelos numéricos de pontes ferroviárias, com base em informações experimentais fornecidas por sistemas SHM, permitirá atualizar sua capacidade de reproduzir de forma confiável a condição estrutural real, considerando os danos existentes. O modelo numérico de referência da ponte pode ser usado para uma avaliação mais precisa da segurança estrutural e da segurança de funcionamento do trem, e para planejar as operações de manutenção.

Agradecimentos. Os autores agradecem a FAPEMIG, CAPES, CNPq e UFOP. O terceiro e quarto autores agradecem o apoio financeiro UIDB/04708/2020 do CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - proveniente de verbas da FCT/MCTES (PIDDAC).

Declaração de autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material aqui incluído como parte do presente trabalho é propriedade (e autoria) dos autores.

Referências

- [1] Dackermann U, Li J, Samali B. Dynamic-Based Damage Identification Using Neural Network Ensembles and Damage Index Method. *Adv Struct Eng* 2010;13:1001–16. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.13.6.1001>.
- [2] Alkayem NF, Cao M, Ragulskis M. Damage localization in irregular shape structures using intelligent FE model updating approach with a new hybrid objective function and social swarm algorithm. *Appl Soft Comput* 2019;83:105604. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105604>.
- [3] Rytter A. *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures*. Aalborg: Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University; 1993.
- [4] Altunisik AC, Kalkan E, Okur FY, Ozgan K, Karahasan OŞ, Bostanci A. Non-destructive modal parameter identification of historical timber bridges using ambient vibration tests after restoration. *Measurement* 2019;146:411–24. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.06.051>.
- [5] Zenzen R, Belaidi I, Khatir S, Abdel Wahab M. A damage identification technique for beam-like and truss structures based on FRF and Bat Algorithm. *Comptes Rendus Mécanique* 2018;346:1253–66. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2018.09.003>.
- [6] Behmanesh I, Moaveni B, Papadimitriou C. Probabilistic damage identification of a designed 9-story building using modal data in the presence of modeling errors. *Eng Struct* 2017;131:542–52. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.10.033>.
- [7] Alkayem NF, Cao M. Damage identification in three-dimensional structures using single-objective evolutionary algorithms and finite element model updating: evaluation and comparison. *Eng Optim* 2018;50:1695–714. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2017.1414206>.
- [8] Katebi L, Tehranizadeh M, Mohammadgholibeyki N. A generalized flexibility matrix-based model updating method for damage detection of plane truss and frame structures. *J Civ Struct Heal Monit* 2018;8:301–14. <https://doi.org/10.1007/s13349-018-0276-5>.
- [9] Jahangiri M, Najafgholipour MA, Dehghan SM, Hadianfard MA. The efficiency of a novel identification method for structural damage assessment using the first vibration mode data. *J Sound Vib* 2019;458:1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.06.011>.
- [10] Jung D-S, Kim C-Y. Finite element model updating on small-scale bridge model using the hybrid genetic algorithm. *Struct Infrastruct Eng* 2013;9:481–95. <https://doi.org/10.1080/15732479.2011.564635>.
- [11] Pedram M, Esfandiari A, Khedmati MR. Frequency domain damage detection of plate and shell structures by finite element model updating. *Inverse Probl Sci Eng* 2018;26:100–32. <https://doi.org/10.1080/17415977.2017.1309398>.
- [12] Mao J, Wang H, Li J. Bayesian Finite Element Model Updating of a Long-Span Suspension Bridge Utilizing Hybrid Monte Carlo Simulation and Kriging Predictor. *KSCE J Civ Eng* 2020;24:569–79. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0983-4>.
- [13] Mathworks. MATLAB. Natick, USA: 2011.
- [14] ANSYS Inc. ANSYS VERSION 12.0. EUA: Swanson Analysis System; 2012.
- [15] Ribeiro D, Calçada R, Delgado R, Brehm M, Zabel V. Finite element model updating of a bowstring-arch railway bridge based on experimental modal parameters. *Eng Struct* 2012;40:413–35. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.013>.
- [16] Moslem K, Nafaspour R. Structural Damage Detection by Genetic Algorithms. *AIAA J* 2002;40:1395–401. <https://doi.org/10.2514/2.1800>.
- [17] Shi ZY, Law SS, Zhang LM. Damage Localization by Directly Using Incomplete Mode Shapes. *J Eng Mech* 2000;126:656–60. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:6\(656\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:6(656)).
- [18] Kim G-H, Park Y-S. An improved updating parameter selection method and finite element model update using multiobjective optimisation technique. *Mech Syst Signal Process* 2004;18:59–78. [https://doi.org/10.1016/S0888-3270\(03\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0888-3270(03)00042-6).
- [19] Jin S-S, Cho S, Jung H-J, Lee J-J, Yun C-B. A new multi-objective approach to finite element model updating. *J Sound Vib* 2014;333:2323–38. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.01.015>.
- [20] Malveiro J, Ribeiro D, Sousa C, Calçada R. Model updating of a dynamic model of a composite steel-concrete railway viaduct based on experimental tests. *Eng Struct* 2018;164:40–52. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.057>.