

IDENTIFICAÇÃO DE DANOS DO TIPO FUROS CIRCULARES EM PLACAS DE COMPÓSITOS USANDO O ALGORITMO DE LICHTENBERG

João Luiz Junho Pereira, joaoluizjp@unifei.edu.br¹
Renan Giulianetti Pereira, renangpereira@unifei.edu.br¹
Ali El-Hafidi, Ali.El-Hafidi@u-bourgogne.fr²
Sebastião Simões da Cunha Junior, e-mail¹

¹Universidade Federal de Itajubá – Instituto de Engenharia Mecânica (IEM)

²Université de Bourgogne – Institut Supérieur de l'Automobile et des Transports (ISAT)

Resumo: A identificação de danos é um importante ramo da engenharia, cujo principal objetivo é garantir a segurança estrutural. Porém, grande parte dos métodos convencionais de identificação de danos são limitados, e não fornecem resultados muito confiáveis, o que os torna em alguns casos, impraticáveis. Neste trabalho foi desenvolvido um estudo sobre a detecção de danos. O problema de identificação de danos é tratado como um problema inverso, que combina o método dos elementos finitos com métodos computacionais inteligentes para obter a melhor resposta possível. Para otimizar os objetivos construídos, foi aplicado o Algoritmo de Lichtenberg, que utiliza conceitos de crescimento aleatório de clusters na natureza. O algoritmo é usado para identificar a localização e o tamanho de dois furos circulares em uma placa de compósito. O algoritmo calcula a frequência natural do material de acordo com suas propriedades e, à medida que há uma mudança nessa frequência, ele consegue convergir a busca, possibilitando sua localização. A vantagem de tal algoritmo é que ele pode ser aplicado à estrutura continuamente para monitorar sua integridade. O conteúdo desenvolvido neste trabalho contribui para o desenvolvimento tecnológico do monitoramento da integridade estrutural.

Palavras-chave: Algoritmo de Lichtenberg, Identificação de Danos, Método de Elementos Finitos, Monitoramento da Integridade Estrutural

1. INTRODUÇÃO

O uso de materiais compósitos tem se tornado cada vez mais constante em diversas áreas da indústria, em especial na aeroespacial. Seu emprego é justificado devido ao fato deste tipo de material possuir boas características mecânicas como, alta rigidez, alta resistência mecânica e principalmente baixa densidade volumétrica. Apesar destas boas características mecânicas, os materiais compósitos podem apresentar determinadas falhas, quando submetidos a condições extremas como sobrecarga estática, impacto, fadiga, erros de projeto e superaquecimento (COSTA, 2010).

Estas falhas podem ser traduzidas como ruptura de fibra, trincas na matriz e delaminações. Grande parte dos métodos utilizados na detecção de danos atualmente é visual ou experimental, como por exemplo, métodos acústicos ou ultrassônicos, partículas magnéticas, radiografias dentre outros. Estes métodos são em grande parte dos casos demorados, caros e ou onerosos, desta forma, exigem que as estruturas estejam localizadas em locais acessíveis e dependem fortemente da habilidade e experiência do profissional que realizará a inspeção (GOMES *et al.*, 2018).

Diante deste cenário, verifica-se a necessidade do emprego de métodos de monitoramento estrutural mais viáveis. Perante isto, as tecnologias de monitoramento da integridade estrutural (*Structural Health Monitoring – SHM*) surgem como uma alternativa promissora, realizando o monitoramento da estrutura de maneira contínua através do emprego de sensores integrados. Este método traz consigo grande segurança, pois detecta falhas de forma rápida impedindo-as de evoluírem a um nível alarmante (HESLEHURST, 2014).

Partindo do princípio que o dano altera propriedades mecânicas das estruturas, métodos inversos utilizando algoritmos poderosos de otimização podem ser empregados para identificar sua severidade e localização. Neste contexto, uma meta-heurística brasileira recém-criada tem tido excelentes resultados. No trabalho de Pereira *et al.* (2021a), o Algoritmo de Lichtenberg (LA) é testado na identificação de trincas em uma placa de alumínio, enquanto que em Pereira *et al.* (2021b), testa-se o algoritmo na identificação de delaminações em placas de materiais compósitos.

Este é o primeiro trabalho a aplicar o LA na identificação de furos circulares em uma placa de material compósito, testando a sua eficiência também na identificação de dois furos circulares. Pretende-se realizar a análise da

viabilidade e robustez da técnica utilizada na detecção de duplos furos circulares. O artigo é organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta uma revisão sobre os conceitos de SHM, frequências naturais e sobre o LA. A Seção 3 apresenta a metodologia utilizada. A Seção 4 apresenta os resultados e discussão para a detecção de furos circulares e a Seção 5 mostra as conclusões.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Monitoramento da Integridade Estrutural em Compósitos

O monitoramento de integridade estrutural, ou SHM, é, uma área composta de métodos que usam diversos tipos de sensores e estratégias para detectar a presença, localização e a severidade de danos estruturais. São reconhecidos pelo seu monitoramento autônomo e de grande confiabilidade e são utilizados principalmente onde métodos tradicionais apresentam custos financeiros e operacionais elevados (GOMES *et al.*, 2018).

Os danos estruturais geram mudanças nas propriedades geométricas e físicas do material (como massa e rigidez), fazendo com que a estrutura apresente comportamentos dinâmicos distintos, quando comparados a estruturas saudáveis. Utilizando-se técnicas computacionais modernas, o método SHM pode analisar essas mudanças e retornar os possíveis danos e condições da estrutura (GOMES *et al.*, 2018).

O monitoramento em materiais compósitos se torna um pouco mais complexo do que em materiais metálicos. Nestes, os danos são facilmente detectados e em alguns casos perceptíveis a visão humana. No caso de materiais compósitos, a estrutura pode apresentar ótimas condições superficiais, enquanto que no interior do material podem ter ocorrido sérios danos. (SUNDARARAMAN, 2013).

2.2. Monitoramento por Meio de Frequências Naturais

A ideia principal por trás de técnicas de detecção de danos que são baseadas na mudança do comportamento dinâmico de uma estrutura está ligada a relação entre os parâmetros modais (frequências naturais, modos de vibração e amortecimento modal) e os parâmetros físicos (massa, rigidez e amortecimento) (MONTALVÃO *et al.*, 2006). Dessa forma, a existência de um dano em uma estrutura acarreta em modificações nas suas propriedades modais.

Estudos realizados por Gopakalakrishnan (2011) avaliam as técnicas baseadas em vibrações para avaliar a redução da rigidez causada por danos, através da alteração das frequências naturais. A grande vantagem de utilizar as frequências naturais para a detecção do dano, é que ela não requer uma análise modal completa, uma análise espectral básica de um teste de excitação com um único sensor resposta já pode ser suficiente.

Portanto, utilizando-se um algoritmo de otimização e combinação, é possível que o mesmo encontre a localização e intensidade de um dano comparando as frequências naturais da estrutura com as que o algoritmo supõe onde encontra-se o dano. Quando a diferença é mínima, o dano é idêntico e portanto, identificado. Tem-se um problema de minimização e por isto, de otimização.

2.3. Algoritmo de Lichtenberg

A natureza é uma fonte de inspiração para pesquisadores desenvolverem técnicas e algoritmos de otimização para problemas de engenharia (YANG, 2020). A evolução da natureza tem ocorrido durante milhões de anos, fazendo com que suas soluções sejam muito eficientes na resolução de problemas. Assim, a ciência pode desenvolver algoritmos meta-heurísticos baseando-se nesses métodos naturais.

O LA é uma nova meta-heurística híbrida que se baseia em trajetória e população ao mesmo tempo. Inspirado nos fenômenos físicos dos raios, onde encontramos as chamadas figuras de Lichtenberg, o LA tem grande capacidade para explorar o espaço de busca e refinar os resultados encontrados em tempo computacional inferior a outras meta-heurísticas (PEREIRA, 2021c).

O algoritmo cria figuras de Lichtenberg no espaço de busca com escalas e rotações aleatórias em cada iteração. Pontos desta figura são selecionados para avaliação da função objetivo, e o ponto de menor valor de cada iteração é o ponto de disparo da próxima figura. Assim, a população é distribuída de acordo com o tamanho da figura, conferindo ao algoritmo um grande potencial de exploração e melhoria das suas soluções. Além disso, essa mesma figura pode ser plotada com uma idêntica, porém menor (variando de 0% a 100% do seu tamanho) para aumentar o refinamento da busca. Assim, temos figuras de Lichtenberg locais (vermelho) e globais (azul), como pode ser visto na Fig.1.

O algoritmo de otimização tem sete parâmetros: Raio de criação da figura (R_c); Número de partículas usadas na construção da figura (N_p); Coeficiente de aderência (S), que determina a densidade da Figura de Lichtenberg; Refinamento local (ref), que cria uma figura menor que força metade da população a estar nela, visando aumentar o refinamento; Um fator que controla a construção de uma nova figura de Lichtenberg a cada iteração (M); Número de iterações (N_{iter}) e o número de pontos selecionados aleatoriamente na figura de Lichtenberg para serem avaliados na função objetivo a cada iteração (Pop).

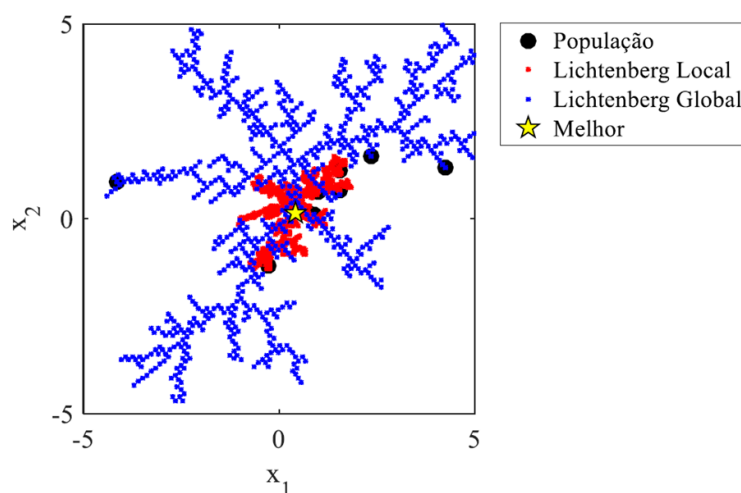


Figura 1. Figura de Lichtenberg formada no LA com parâmetros de otimização.

3. METODOLOGIA

A metodologia se baseia no princípio de que danos geram alterações mecânicas que modificam as frequências naturais estruturais. Quanto a estrutura está em uso e começa a apresentar frequências naturais diferentes à da estrutura saudável, o Algoritmo de Lichtenberg inicia uma busca pelo dano através de um método inverso utilizando o Método de Elementos Finitos para calcular as frequências naturais. Quando o algoritmo sugere um dano que seja idêntico ao que a estrutura está apresentando, as frequências naturais serão idênticas. Neste trabalho, como não há um estudo em campo, ter-se-á a modelagem de uma placa de material compósito com danos de tamanho e localizações definidas. Então as primeiras seis frequências naturais são calculadas. Este é o método direto.

Então, o Algoritmo de Lichtenberg é aplicado através de um método inverso supondo dimensões e localizações de dois furos circulares. Como otimizador, ele caminha no sentido de minimizar a função que calcula a diferença das frequências naturais dos métodos Direto e Inverso. Repare que a função objetivo deste problema o próprio software de elementos finitos, sendo impossível a aplicação de um método de otimização baseado em gradiente, já que não existem funções explícitas.

3.1. Modelagem do Problema Direto

A placa analisada e modelada é de um compósito fibra de carbono, possui forma quadrada de dimensões 30 x 30 cm e espessura de 5mm. Suas propriedades mecânicas são apresentadas na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1. **Propriedades do Material Compósito utilizado**

Propriedade	Valor
E1	83,02 MPa
E2	5,13 MPa
G12	8,37 MPa
ν_{12}	0,32
ρ	1408,10 kg/m ³

O modelo da estrutura foi construído utilizando o software *ANSYS® Mechanical APDL*. Os elementos utilizados foram elementos de casca (*shell*), recomendável para analisar estruturas finas a moderadamente espessas. Esse elemento tem oito nós e seis graus de liberdade por nó: translação nos eixos x , y e z , e rotação nos eixos x , y e z . As extremidades da placa são livres, como condição de contorno.

3.2. Modelagem do Problema Inverso

Tendo-se o modelo numérico que permite o cálculo das frequências naturais a partir da placa de material compósito com os danos sugeridos pelo Algoritmo de Lichtenberg e a frequência natural referência com dano conhecido, foi feita uma conexão iterativa entre o *ANSYS® Mechanical APDL* e o *MATLAB®*. O LA então compara cada uma das frequências naturais sugeridas e calculadas com a de referência através da função objetivo expressa na Equação 1. Onde $\omega_i^{calculado}$ são as frequências naturais calculadas pelo AL em cada iteração e ponto da população e ω_i^{real} , é a frequência natural conhecida calculada com um furo circular presente na estrutura. São utilizadas as seis

primeiras frequências naturais não-nulas da estrutura danificada, que são suficientes para realizar a identificação de danos (BANDARA *et al.* 2014).

$$J = \sqrt{\sum_{i=7}^{12} \left(1 - \frac{\omega_i^{\text{calculado}}}{\omega_i^{\text{real}}}\right)^2} \quad (1)$$

A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados no LA e a definição do espaço de busca para o algoritmo. Note que o número de variáveis é conforme o número de furos circulares, sendo que cada um possui localizações x e y , e um raio r que caracteriza sua severidade. Para um furo, tem-se então 3 variáveis e para dois, 9. Neste estudo serão considerados 4 casos: i) Um furo no centro da placa, ii) um furo deslocado em relação ao centro, iii) dois furos com raios diferentes e localização simétrica na placa e iv) dois furos com raios diferentes e localização aleatória na placa. O computador utilizado é um DELL core i7 com 8GB de ram e 1TB de disco rígido. Não houve normalização para tratar dos dados do problema.

Tabela 2. Parâmetros de otimização do LA.

PARÂMETROS		Um furo	Dois Furos
LB	<i>Lower Bounds</i>	[0 0 0]	[0 0 0 0 0 0]
UB	<i>Upper Bounds</i>	[0,3 0,3 15]	[0,3 0,3 15 0,3 0,3 15]
d	Número de variáveis	3	6
pop	População	100	100
N_{iter}	Número de iterações	100	100
ref	Refinamento	0.4	0.4
N_p	Número de partículas	100000	100000
S	Coefficiente de aderência	1	1
R_c	Raio de criação	150	150
M	Criação figuras de Lichtenberg	0	0

4. RESULTADOS

O primeiro estudo de caso se refere à identificação de um furo circular. O LA foi executado 10 vezes para cada um destes casos, tendo-se induzido danos com tamanhos de 10, 6, 3 e 1 mm. Os resultados médios estão na Tabela 3 e os resultados visuais estão na Figura 2. É possível notar que o LA foi capaz de encontrar satisfatoriamente o furo circular para todos os casos, sendo que quanto menor o furo, maior foi erro. Isto se justifica pelo fato de que um dano menor influencia menos na alteração das propriedades modais da placa de compósito.

Tabela 3. Resultados gerais na identificação de um furo circular

Caso	Dano induzido		Dano encontrado		
	Localização	Tamanho	x (mm)	y (mm)	r (mm)
1	Deslocado $x = 0.1$ $y = 0.2$	10mm	0,09938	0,19981	10,16651
2		6mm	0,09535	0,21069	6,05538
3		3mm	0,10398	0,20687	3,70522
4		1mm	0,12046	0,22203	2,76560
5	Centrado $x = 0.15$ $y = 0.15$	10mm	0,14996	0,14755	10,54381
6		6mm	0,15086	0,15226	6,10218
7		3mm	0,15302	0,16204	3,98797
8		1mm	0,15461	0,16439	3,05618

Também contendo 10 simulações para cada caso, a identificação de danos para dois furos foram executadas pelo LA. Foram considerados dois casos principais: furos em posição simétrica em relação ao centro da placa e em posições aleatórias. Para cada um dos casos, foram considerados furos de tamanhos diferentes, sendo três tipos: 10 e 6 mm, 6 e 3 mm e 3 e 1 mm. Os Resultados das médias das simulações estão na Tabela 4 e os resultados visuais estão na Figura 3. Mais uma vez é possível notar que o LA pôde encontrar satisfatoriamente os furos duplos para todos os casos, sendo que quanto menor os furos, maior o erro.

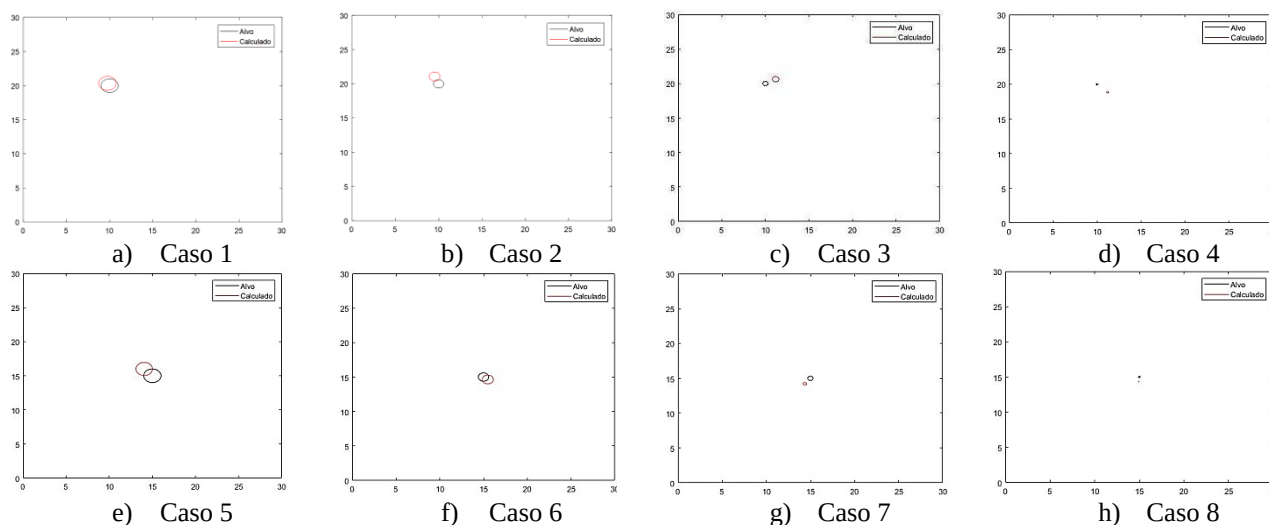


Figura 2. Resultados visuais na identificação de um furo circular

Tabela 4. Resultados gerais na identificação de dois furos circulares

Caso	Danos induzidos		Danos encontrados					
	Localizações	Tamanhos	x_1 (mm)	y_1 (mm)	r_1 (mm)	x_2 (mm)	y_2 (mm)	r_2 (mm)
9	Simétricos	10 e 6 mm	0,1032	0,1584	10,5781	0,2131	0,1601	6,3346
10	$x_1 = 0,1$	6 e 3mm	0,2816	0,1549	5,9303	0,1963	0,1499	3,6926
11	$y_1 = 0,15$	3 e 1 mm	0,1025	0,1621	3,6144	0,1987	0,1480	2,4980
	$x_2 = 0,2$							
	$y_2 = 0,15$							
12	Não simétricos	10 e 6 mm	0,0795	0,1651	10,1869	0,2235	0,0649	6,0994
13	$x_1 = 0,08$	6 e 3mm	0,0811	0,1634	6,7090	0,2231	6,0321	3,5520
14	$y_1 = 0,15$	3 e 1 mm	0,0893	0,1528	3,9588	0,2141	0,0584	2,7114
	$x_2 = 0,2$							
	$y_2 = 0,06$							

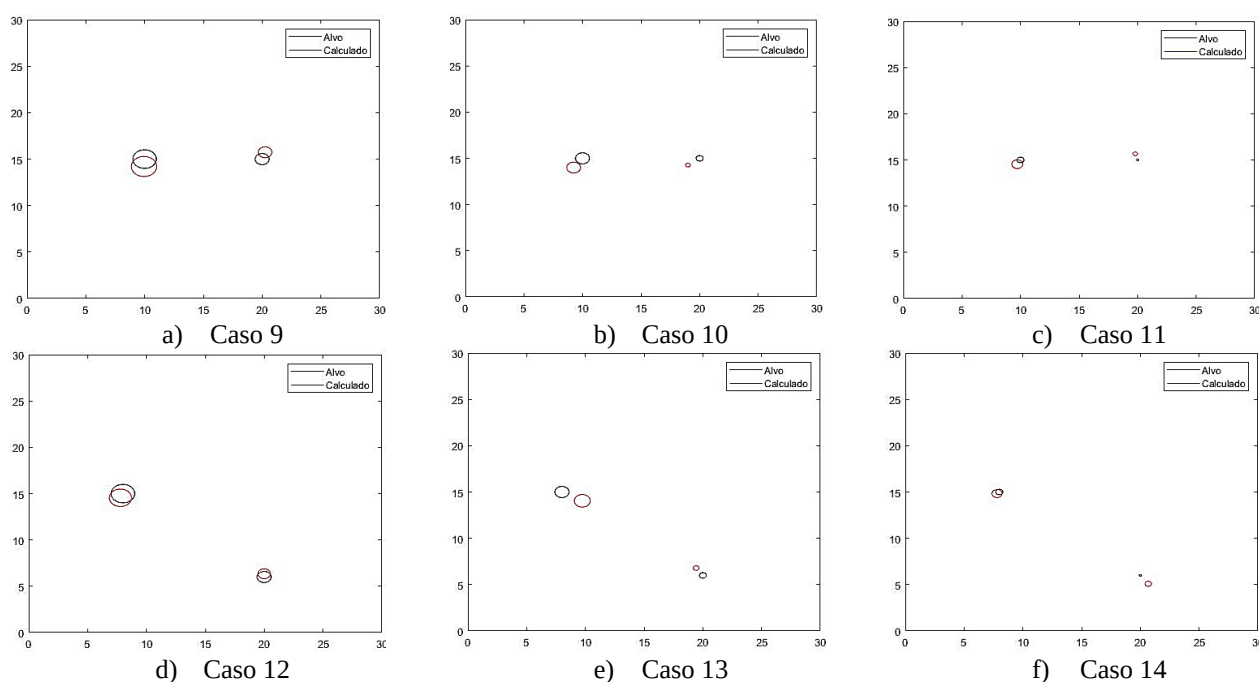


Figura 3. Resultados visuais na identificação de dois furos circulares

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho o Algoritmo de Lichtenberg é aplicado na identificação de danos do tipo furo circular. Inspirado pelo fenômeno físico de relâmpagos e sendo uma das primeiras meta-heurísticas do Brasil, o algoritmo encontrou satisfatoriamente a localização e dimensão de furos circulares em uma placa de material compósito.

Inicialmente, foi induzido um único furo na placa de material compósito, sendo de 10, 6, 3 e 1 mm localizados no centro e deslocados em relação a este na placa de material compósito, totalizando 8 casos de identificação de danos. Então, mais uma série de estudos foram induzidas com dois furos circulares. Inicialmente, estando simétricos na placa e depois estando em região aleatória. Foram considerados para cada uma destas furos de 10 e 6 mm, 6 e 3 mm e então 3 e 1 mm. Em todos os casos o Algoritmo de Lichtenberg encontrou os danos com bastante precisão, ainda que furos menores tenham sido menos interceptados devido à menor capacidade de gerar alterações significativas nas frequências naturais.

Portanto, o algoritmo se mostrou capaz e eficiente para mais um tipo de aplicação dentro da Engenharia Mecânica.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer as agências de suporte brasileiras CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais –APQ – 00385-18).

7. REFERÊNCIAS

- BANDARA, R. P.; CHAN, T. H.; THAMBIRATNAM, D. P. Structural damage detection method using frequency response functions. *Structural Health Monitoring*, 13(4):418-429, 2014.
- COSTA, D. I. G., Análise Numérica de Falhas em Materiais Compósitos Laminados Usando um Critério Baseado em Fenômenos Físicos. Campinas. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2010.
- GOMES, G. F.; MENDÉZ, Y. A. D.; ALEXANDRINO, P. S. L.; CUNHA Jr, S. S., ANCELOTTI Jr, A. C. The use of intelligent computational tools for damage detection and identification with an emphasis on composites – A review. *Composite Structures*, v. 196, p. 44-54, 2018. ISSN 0263-8223.
- GOPALAKRISHNAN, S., RUZZENE, M., HANAGUD, S., Computational techniques for damage detection, classification and quantification. Em *Computational Techniques for Structural Health Monitoring*, 2011.
- HESLEHURST, R. B. Defects and Damage in Composite Materials and Structures. 1ª. ed. [S.l.]: CRC Press, 2014.
- MONTALVÃO, D.; MAIA, N. M. M.; RIBEIRO, A. M. R. A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials. *Shock and Vibration Digest*, 2006. 295-324.
- PEREIRA J.L.J., FRANCISCO MB, DINIZ CA, ANTÔNIO OLIVER G, CUNHA SS, GOMES GF. Lichtenberg algorithm: A novel hybrid physics-based meta-heuristic for global optimization. *Expert Syst Appl* 2021;170.
- PEREIRA, J. L. J.; FRANCISCO, M. B.; CUNHA Jr, S. S.; GOMES, G. F. A powerful Lichtenberg Optimization Algorithm: a damage identification case study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 97, p. 104055, 2021b. ISSN 0952-1976.
- PEREIRA, J. L. J.; CHUMAN, M.; CUNHA Jr, S. S.; GOMES, G. F. Lichtenberg optimization algorithm applied to crack tip identification in thin plate-like structures. *Engineering Computations*, v. 38, p. 151-166, 2021a. ISSN 0264-4401.
- SUNDARARAMAN, S., ADAMS, D., RIGAS, E. (2003), Complementary methods for characterizing damage in heterogeneous structures. *Proceedings of the 16th U.S. Army Symposium on Solid Mechanics*.
- YANG, X.-S. *Nature-Inspired Optimization Algorithms*. 2ª. ed. Londres: Academic Press, 2020.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DAMAGE IDENTIFICATION OF CIRCULAR HOLES IN COMPOSITE PLATES USING LICHTENBERG ALGORITHM

João Luiz Junho Pereira, joaoluizjp@unifei.edu.br¹

Renan Giulianetti Pereira, renangpereira@unifei.edu.br¹

Ali El-Hafidi, Ali.El-Hafidi@u-bourgogne.fr²

Sebastião Simões da Cunha Junior, e-mail¹

¹Universidade Federal de Itajubá – Instituto de Engenharia Mecânica (IEM)

²Université de Bourgogne – Institut Supérieur de l'Automobile et des Transports (ISAT)

Resumo: Damage detection is an important branch of engineering, whose main objective is to guarantee structural safety. However, most conventional methods of identifying damage are known, and do not provide well-known results, which in some cases make them impractical. In this work a study was developed on the detection of damages. The damage identification problem is treated as an inverse problem, which combines finite element method with intelligent computational methods to obtain the best possible answer. To optimize the built objectives, the Lichtenberg Algorithm was applied, which uses concepts of random growth of clusters in nature. The algorithm is used to identify the location and size of two circular holes in a composite plate. The algorithm calculates the natural frequency of the material according to its properties, and as there is a change in that frequency, it obtains to converge the search, enabling its location. The advantage of such an algorithm is that it can be applied to the structure continuously to monitoring its integrity. The content developed in this work contributes greatly to the technological development of structural integrity monitoring

Keywords: Lichtenberg Algorithm, Damage Identification, Finite Element Method, Structural Health Monitoring