

IDENTIFICAÇÃO DE DANOS EM ESTRUTURAS COM DIFERENTES MATERIAIS

Ricardo Domingos Abreu Junior, ricardo.jr@unifei.edu.br¹
Ana Laura Cezario Israel, marli.israel@yahoo.com.br¹
João Luiz Junho Pereira, joaoluizjp@unifei.edu.br¹
Benjamin Valkenborgh, benjamin.valkenborgh@condorcet.be²
Sebastião Simões da Cunha Junior, sebas@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá

²CONDORCET – Hainaut Provincial High School

Resumo: A identificação de danos estruturais é de suma importância para garantir a correta e segura utilização de um dado sistema mecânico. No entanto, alguns métodos tradicionais de detecção de danos são caros e limitados o que onera sua utilização. Nesse contexto, métodos de monitoramento da integridade estrutural que utilizam meta-heurísticas de otimização surgem como uma alternativa viável e mais eficiente. Este trabalho apresenta um estudo de detecção de furos circulares em uma placa compósita fina constituída por dois materiais metálicos distintos, através da utilização do Algoritmo de Lichtenberg, uma meta-heurística que utiliza Figuras de Lichtenberg, e visa estudar a eficiência da utilização do algoritmo dedicado à detecção de danos em estruturas mecânicas. Utilizando uma combinação de método dos elementos finitos com algoritmos computacionais inteligentes, o problema de detecção de danos é tratado como um problema inverso. A estrutura teste, obtida por meio do Método de Elementos Finitos, é uma placa compósita fina quadrada (30×30cm), e o dano estrutural (furo central) da estrutura tem raios que variam entre 3, 6 e 8mm. A identificação do dano foi baseada no comportamento vibracional da placa, comparando o resultado sugerido pelo algoritmo e os dados conhecidos do método direto. De acordo com os dados obtidos, conclui-se que a metodologia e ferramentas empregadas oferecem níveis satisfatórios de detecção de danos para as três condições propostas. O algoritmo permitiu a identificação e caracterização dos furos circulares nas placas de matérias metálicos, sendo esses detalhes essenciais para o estudo de impacto do dano nas condições de uso da estrutura. Além disso, o método apresenta vantagens notáveis como o monitoramento remoto e contínuo da saúde da estrutura, economia no tempo e custos de manutenção.

Palavras-chave: Identificação de Danos, Monitoramento da Integridade Estrutural, Meta-heurísticas de Otimização, Algoritmo de Lichtenberg.

1. INTRODUÇÃO

A manutenção da integridade de estruturas mecânicas é de grande importância para que a sua utilização seja feita da maneira mais correta e segura possível. Assim, existe um grande interesse em detectar danos nessas estruturas, evitando acidentes e reduzindo custos de manutenção. Gomes *et al.* (2018) afirmam que o monitoramento de estruturas mecânicas permite a detecção, localização e até a previsão de danos em estruturas mecânicas, diminuindo os riscos de consequências sociais, econômicas e ambientais.

Segundo Gomes *et al.* (2018), um dano estrutural pode ser considerado como uma mudança na geometria ou propriedades físicas do material. Essas alterações físicas, especialmente na rigidez, fazem com que a estrutura danificada tenha um comportamento mecânico diferente da estrutura original. O dano estrutural causa a redução local da rigidez da estrutura e, como consequência, modifica suas características.

Com o número cada vez maior de estruturas mecânicas em serviço (especialmente no ambiente aeronáutico), são necessárias novas tecnologias para sustentar o monitoramento rápido e eficiente. Assim, métodos de monitoramento de integridade estrutural (*Structural Health Monitoring* – SHM) aparecem como uma alternativa de viabilidade muito alta, já que permitem que danos ou a degradação de componentes sejam detectados precocemente, antecipando ações corretivas e impedindo a evolução dos danos à níveis alarmantes (Heslehurst, 2014).

No trabalho de Gomes *et al.* (2018), os autores demonstram o uso de simulações numéricas combinadas com dados experimentais para a identificação e caracterização de danos estruturais do tipo furo circular e delaminação em placas de materiais compósitos. Vale ressaltar que, apesar da natureza do trabalho citado anteriormente, uma boa parcela das obras

publicadas na literatura envolvendo furos circulares fazem apenas a análise da concentração de tensão e esforços, e não a detecção e caracterização dos furos.

Utilizando uma meta-heurística de otimização chamada Algoritmo de Lichtenberg, o trabalho de Pereira *et al.* (2021a) avalia a eficiência da identificação de trincas em uma placa de alumínio, enquanto que o trabalho de Pereira *et al.* (2021b) utiliza o mesmo método para realizar a detecção de delaminações em placas de materiais compósitos.

O objetivo principal do trabalho desenvolvido é realizar a avaliação de uma meta-heurística de otimização global denominada Algoritmo de Lichtenberg, ou *Lichtenberg Algorithm* (LA), utilizada em conjunto com Método dos Elementos Finitos (MEF), na identificação e caracterização de danos do tipo furos circulares, de diferentes dimensões, em uma placa fina composta de materiais diferentes, dispostos lateralmente. Ao final do trabalho, pretende-se realizar a análise da viabilidade e robustez da técnica utilizada na detecção de furos circulares na interseção entre duas placas de materiais diferentes, determinando a sua localização e dimensão.

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. A Seção 5, ao final, mostra as conclusões.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Monitoramento de Integridade Estrutural

O monitoramento de integridade estrutural, ou SHM, é, atualmente, uma área que apresenta um grande número de inovações e estudos para o seu desenvolvimento, atraindo grande interesse da comunidade científica. Esses métodos 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).

As técnicas SHM trazem algumas vantagens em relação aos métodos tradicionais, como, por exemplo, a detecção de danos em estágio inicial. Para que isto ocorra, deve-se fazer uso de sensores, que são responsáveis por fornecer dados confiáveis para identificar, localizar e dimensionar danos estruturais. A inclusão de sensores nos estágios iniciais de projeto da estrutura permite que os sistemas de monitoramento possam trabalhar com confiabilidade e melhor integrados ao funcionamento da estrutura, diminuindo custos de ciclo de vida e de manutenção (Stepinski *et al.*, 2013).

Os danos estruturais são considerados como 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 em condições saudáveis. O método SHM usa as características de uma estrutura saudável para analisar e retornar os possíveis danos e condições da estrutura que está sendo analisada (Gomes *et al.*, 2018).

A inspeção de estruturas mecânicas pode ser dividida em quatro diferentes níveis: o primeiro nível detecta que existe um dano na estrutura, sem afirmar localização ou gravidade; o segundo nível informa a posição do dano na estrutura; o terceiro nível avalia as características do dano; o quarto nível fornece uma estimativa do tempo de vida da estrutura e um prognóstico do dano (Mohan *et al.*, 2014). Através de métodos inversos de otimização, o trabalho aqui apresentado realiza a inspeção de níveis 2 e 3. Sendo assim, pode-se localizar o dano e avaliar as características do mesmo.

2.2. Monitoramento por Meio de Frequências Naturais

Os danos, como citado anteriormente, podem ser considerados como alterações nas propriedades físicas, geométricas e no comportamento dinâmico de uma estrutura. A mudança dessas propriedades (principalmente a rigidez e a massa) faz com que uma estrutura danificada apresente alteração no seu comportamento dinâmico quando comparado a uma estrutura saudável. No caso da rigidez, o dano causa uma redução localizada desse parâmetro, modificando suas características dinâmicas (Gomes *et al.*, 2018). Alguns exemplos de danos são: trincas, furos, vazios, delaminação entre outros.

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) (Pereira *et al.*, 2021b). Dessa forma, a existência de um dano em uma estrutura acarreta em modificações nas suas propriedades modais.

As frequências naturais podem ser obtidas sem um recurso de teste modal completo, utilizando uma análise espectral básica de um único teste de excitação aleatório com um sensor de resposta. O dano causa uma redução nos valores de frequência natural da estrutura. Em métodos que utilizam variações nas frequências naturais de baixa frequência pode-se utilizar um único ponto da estrutura em conjunto com uma análise dinâmica do sistema para detectar o dano. Nesse tipo de análise tem-se uma vantagem, já que a frequência natural e a razão de amortecimento podem ser obtidas através de um único ponto na estrutura, independentemente da posição escolhida para realizar a medição.

No entanto, é necessária uma análise dinâmica da estrutura precisa o suficiente, dependendo do posicionamento dos sensores, para que seja possível obter as formas modais e estimar a localização e severidade do dano. Como ainda não existem estudos na literatura para posicionamento de sensores em estruturas similares a utilizada neste trabalho, foi utilizada a análise por frequências naturais, uma vez que é uma propriedade precisa e com aquisição mais simplificada.

2.3. Algoritmo de Lichtenberg

Pode-se definir otimização como um processo que busca a melhor solução dentro de um conjunto de soluções possíveis. Existem diversos objetivos quando se fala em otimização: minimizar o consumo de energia, maximizar a produção de uma fábrica, maximizar o lucro de uma operação, maximizar a eficiência de um motor a combustão interna e etc. No mundo real, onde recursos são finitos, é necessário que sejam encontradas soluções otimizadas para consumir esses recursos valiosos e restritos (Yang, 2020).

Quando se trata problemas de engenharia, apenas uma solução não é o suficiente. Deve-se encontrar a melhor solução para o problema, ou seja, é preciso encontrar a solução ideal para o problema. Como a maioria das aplicações de engenharia são problemas não-lineares, é indispensável que sejam utilizadas simulações computacionais para encontrar a solução otimizada de um problema. (Yang, 2020).

Por trás de qualquer método computacional existem algoritmos que coordenam o funcionamento das simulações. A eficiência e o desempenho de um algoritmo são determinados de acordo com os componentes básicos e sua interação. Conforme diz Yang (2020), a natureza é uma fonte de inspiração para pesquisadores desenvolverem técnicas e algoritmos de otimização para problemas científicos e da engenharia. 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 utiliza um algoritmo de trajetória e população em seu processo de iteração. Inspirado nos fenômenos físicos dos raios, onde encontramos as chamadas figuras de Lichtenberg, o LA tem grande potencial para explorar o espaço de busca. Segundo Pereira (2020), ele apresentou excelente precisão em funções teste encontradas na literatura.

O algoritmo cria figuras de Lichtenberg usando a teoria de *diffusion-limited aggregation* 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 números locais (vermelho) e globais (azul), como pode ser visto na Fig.1.

O algoritmo de otimização tem seis 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 aglomeração;
- Número de pontos avaliados na figura ou população (pop);
- Refinamento local (ref);
- Construção de uma nova figura a cada iteração (M);
- Número de iterações (N_{iter}).

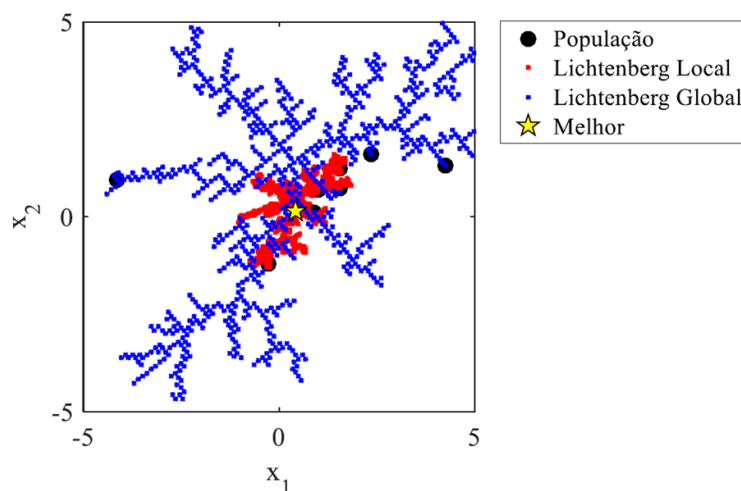


Figura 1. Figura de Lichtenberg formada no LA com parâmetros de otimização.

3. METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho consiste do uso de dois métodos computacionais: modelagem utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) e a otimização utilizando o LA.

Na modelagem do problema direto utilizando o MEF, a estrutura computacional é construída simulando uma placa na condição danificada (furo circular). O LA entra na modelagem do problema inverso para identificar a presença e característica do furo circular.

3.1. Modelagem do Problema Direto

O MEF é o modelo matemático utilizado para resolver, computacionalmente, problemas regidos por equações diferenciais em domínios complexos. Ele é adotado para o processamento da resposta, calculando as propriedades de uma estrutura. O MEF é utilizado, normalmente, para resolver problemas diretos em estruturas, isto é, tem-se uma determinada condição de entrada e, assim, determina-se uma condição de saída. Dessa maneira, o MEF pode ser aplicado na validação de um projeto, na previsão de respostas estruturais ou para identificar características desconhecidas em um sistema (De Roeck, 2019).

A estrutura é uma placa composta de dois materiais metálicos distintos dispostos lateralmente. A utilização de um material nesses moldes visa o estudo de situações onde se tem o uso de diferentes materiais metálicos em conjunto em estruturas diversas, como na indústria aeronáutica, naval e automobilística. A placa foi modelada em material sólido, de forma quadrada, com dimensões $0,30 \times 0,30\text{m}^2$, com 5mm de espessura. A estrutura é constituída de duas partes: a parte A, de dimensões $0,15 \times 0,30\text{m}^2$, composta de aço AISI 304; a parte B, de dimensões $0,15 \times 0,30\text{m}^2$, composta de alumínio 6061-T6. As partes são ligadas uma à outra pelos lados maiores, formando assim a placa principal com as dimensões já citadas. Essa placa não existiu fisicamente, sendo restrita a modelagem descrita a seguir.

A placa conta com um furo, de raio r mm, com centro na posição $[0,15;0,15]$. Esse furo está centralizado sobre a união das duas placas e serve para representar um possível descolamento entre as partes A e B, por exemplo. Na Tab. 1 é possível encontrar as informações dos materiais utilizados nas simulações.

Tabela 1. Propriedades dos materiais utilizados.

PROPRIEDADE	AÇO AISI 304	ALUMÍNIO 6061-T6
Massa específica (kg/m^3)	7860	2710
Módulo de elasticidade (E) (GPa)	193	68,9
Módulo de elasticidade (G) (GPa)	75	26
Tensão Escoam. (tração) (MPa)	207	255
Tensão Escoam. (compressão) (MPa)	207	255
Tensão Escoam. (cisalhamento) (MPa)	-	131
Tensão Última (tração) (MPa)	517	290
Tensão Última (compressão) (MPa)	517	290
Tensão Última (cisalhamento) (MPa)	-	186
Coeficiente de Poisson	0,27	0,35

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 partes A e B que compõe a placa são modeladas de acordo com as especificações detalhadas anteriormente. Como as placas não existiram fisicamente, foi necessário definir uma forma de junção no MEF, sendo escolhido um comando *bounded* (placas coladas). A qualidade da malha é essencial para a obtenção de resultados confiáveis, por isso optou-se por utilizar uma malhagem automática otimizada. A Fig. 2 mostra a representação da placa e o modelo da estrutura construído no MEF, já com a malha e materiais definidos. É importante notar que os elementos em azul têm atribuído o material aço AISI 304, enquanto que os elementos em roxo têm atribuído o material alumínio 6061-T6.

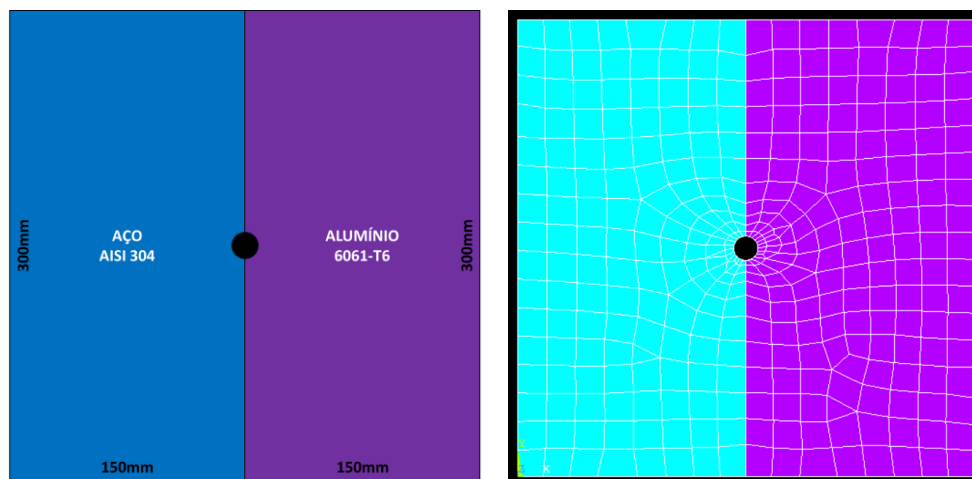


Figura 2. Representação da placa (à esquerda) e modelo MEF (à direita).

Ainda utilizando-se do software, é executada a análise modal da estrutura. Essa análise é feita entre as frequências de 0 a 20kHz, extraindo os 16 primeiros modos de vibração da estrutura.

Ao término da modelagem é gerado um código de todos os procedimentos. Esse código foi adaptado para ser implementado no programa computacional de engenharia *MATLAB®*, onde será necessário receber variáveis vindas do código de programação do LA.

3.2. Programação do *Lichtenberg Algorithm*

O objetivo deste trabalho não consiste em realizar a programação do LA, uma vez que todo o algoritmo foi desenvolvido no trabalho de Pereira (2020). O intuito principal é realizar a aplicação deste algoritmo em um cenário com uma estrutura composta de materiais diferentes, buscando verificar a versatilidade, eficiência e desempenho do LA quando utilizado em condições diferentes daquelas nas quais ele foi desenvolvido.

Como informado anteriormente, o LA opera com alguns parâmetros que devem ser fornecidos pelo usuário, com o intuito de que o funcionamento ocorra da maneira mais otimizada possível. Assim, a Tab. 2 apresenta os parâmetros que foram utilizados nas simulações executadas.

Não foi utilizada nenhuma função de teste no LA, uma vez que a eficiência do algoritmo já foi comprovada no trabalho de Pereira (2020). As modificações feitas no código para esse trabalho não representam mudanças que alterariam a forma como funciona o algoritmo.

Tabela 2. Parâmetros de otimização do LA.

PARÂMETROS		VALOR ($r = 6$ ou 8mm)	VALOR ($r = 3\text{mm}$)
LB	<i>Lower Bounds</i>	[0.00 0.00 0]	[0.00 0.00 0]
UB	<i>Upper Bounds</i>	[0.30 0.30 10]	[0.30 0.30 10]
d	Número de variáveis	3	3
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
im	Visualização de figuras	0	0

A identificação do dano na placa será baseada na solução do comportamento vibracional sugerida pelo LA comparada com o comportamento da placa com dano conhecido (problema direto, obtido pelo MEF). Vale ressaltar que as frequências usadas na comparação poderiam ter origem em sensores instalados na placa que está sob avaliação, se um problema prático estivesse sendo estudado. Para solucionar o problema de identificação do dano, faz-se o uso de uma função objetivo que, quando devidamente minimizada, é capaz de fornecer a solução do problema.

A função objetivo usada neste trabalho busca comparar as frequências naturais conhecidas (obtidas pelo MEF, ou por sensores na estrutura) e as frequências naturais calculadas pelo LA. A função está representada abaixo pela Eq. (1). A minimização neste caso se dá pela diferença entre os valores conhecidos das frequências naturais de vibração (ω) do dano real e os valores de frequências naturais de vibração calculados pelo LA. Vale ressaltar que não foram utilizadas todas as frequências naturais obtidas pelo MEF. Um estudo de Bandara *et al.* (2014) observou que as seis primeiras frequências naturais não-nulas da estrutura danificada são suficientes para realizar a identificação de danos. Considerando que esse trabalho usa um modelo de placa quadrada livre nos quatro lados (livre-livre-livre-livre), as frequências naturais de número 1 a 6 representam os seis modos de corpo rígido da placa e assim, são nulas. Dessa forma utiliza-se apenas as frequências naturais de vibração de número 7 até 12.

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

onde: J é a função objetivo, ω_i^{real} são as frequências naturais de vibração reais e $\omega_i^{otimizada}$ são as frequências naturais de vibração obtidas pelo LA.

4. RESULTADOS

O trabalho aqui desenvolvido tem como objetivo avaliar a eficiência e a robustez de um algoritmo meta-heurístico na detecção de furos circulares em placas compósitas formadas pela união de dois materiais metálicos distintos. Considera-se esse tipo de dano como um dano complexo em termos de modelagem numérico-matemática, uma vez que o mesmo faz uso do MEF para cálculo do problema direto. Serão trabalhadas três variáveis:

- Posição x do furo circular;
- Posição y do furo circular;
- Raio r do furo circular.

Além das variáveis, a modelagem ainda conta com placas de dois materiais diferentes. Na união dessas duas placas está localizado o furo circular, o que pode ser considerado como um fator extra de complexidade na hora da simulação. Assim, o intuito do estudo está em validar a capacidade do LA em detectar este tipo de dano, através da análise modal.

Foi realizada a análise em duas situações. Determinou-se que o furo circular estaria localizado na linha de união entre as placas, local onde haveria maior número de fatores de complexidade para o algoritmo. Sendo assim, o furo sempre estaria na posição $[0,15;0,15]$ (centro da placa) das coordenadas cartesianas. O trabalho foi executado com o furo em três dimensões de raio: 3mm, 6mm e 8mm, com o intuito de observar a sensibilidade do algoritmo em diferentes tamanhos de furos.

Para aplicar o algoritmo, deve-se definir as suas variáveis de funcionamento e otimização. Esses parâmetros definem a eficiência do LA na busca por danos. Os valores escolhidos foram retirados de intervalos recomendados no trabalho de Pereira (2020). Pode-se encontrar os valores dessas variáveis na Tab. 3. Como apresentado na seção 2.3, o número de população é fixo, mas os pontos selecionados são aleatórios a cada iteração, aproximando do ótimo global, e, em alguns momentos, explorando melhor o espaço de busca para verificar se o resultado não está em um ótimo local.

Tabela 3. Parâmetros de entrada do LA nas simulações.

PARÂMETRO	VALOR ($r = 6$ ou 8mm)	VALOR ($r = 3\text{mm}$)
LB	$[0.05 \ 0.05 \ 5]$	$[0.05 \ 0.05 \ 0]$
UB	$[0.25 \ 0.25 \ 15]$	$[0.25 \ 0.25 \ 10]$
d	3	3
pop	100	100
N_{iter}	100	100
ref	0.4	0.4
N_p	100000	100000
S	1	1
R_c	150	150
M	0	0
im	0	0
$E1$	193	193
$E2$	68.9	68.9
$v1$	0.27	0.27
$v2$	0.35	0.35
$dens1$	7860	7860
$dens2$	2710	2710
xm	0.15	0.15
ym	0.15	0.15

Para cada análise do trabalho, foram realizadas oito simulações de detecção de danos usando o algoritmo LA. Esse número de simulações foi estabelecido levando em conta que técnicas meta-heurísticas se baseiam em buscas aleatórias, assim, resultados diferentes são esperados a cada simulação. Definiu-se o número oito devido ao número de variáveis, usando a regra de “ $2n$ ” simulações, onde n é o número de variáveis, que nessa simulação são três: x , y e r . Nas Tab. 4, 5 e 6 pode-se encontrar os resultados de todas as simulações realizadas para as três situações. Não houve necessidade de normalização dos dados.

Tabela 4. Resultados para simulação com $r = 8\text{mm}$.

Variáveis	x (m)	y (m)	r (mm)	J
Objetivo	0,1500	0,1500	8,000	0,0000
#1	0,1500	0,1533	8,000	0,1414
#2	0,1500	0,1468	7,995	0,0000
#3	0,1500	0,1497	7,996	0,0000
#4	0,1500	0,1493	8,003	0,1000
#5	0,1498	0,1539	8,010	0,1414
#6	0,1500	0,1505	7,995	0,0000
#7	0,1500	0,1537	7,992	0,1000
#8	0,1502	0,1547	8,001	0,1000
Média	0,1500	0,1515	7,999	0,0729
Desv. Pad.	0,0001	0,0028	0,006	0,0627

Tabela 5. Resultados para simulação com $r = 6\text{mm}$.

Variáveis	x (m)	y (m)	r (mm)	J
Objetivo	0,1500	0,1500	6,000	0,0000
#1	0,1498	0,1444	6,014	0,1000
#2	0,1500	0,1468	6,002	0,1000
#3	0,1500	0,1492	5,997	0,0000
#4	0,1498	0,1448	6,005	0,1414
#5	0,1498	0,1489	6,006	0,1000
#6	0,1500	0,1520	5,981	0,1000
#7	0,1502	0,1476	6,011	0,1000
#8	0,1500	0,1504	5,992	0,1000
Média	0,1499	0,1480	6,001	0,0927
Desv. Pad.	0,0001	0,0026	0,011	0,0402

Tabela 6. Resultados para simulação com $r = 3\text{mm}$.

Variáveis	x (m)	y (m)	r (mm)	J
Objetivo	0,1500	0,1500	3,000	0,0000
#1	0,1498	0,1520	3,017	0,0000
#2	0,1504	0,1468	3,010	0,0000
#3	0,1503	0,1505	2,997	0,1000
#4	0,1497	0,1633	3,033	0,0000
#5	0,1502	0,1485	3,066	0,1000
#6	0,1497	0,1401	3,120	0,1000
#7	0,1493	0,1474	3,011	0,1000
#8	0,1495	0,1405	3,036	0,1414
Média	0,1498	0,1486	3,036	0,0677
Desv. Pad.	0,0001	0,0028	0,006	0,0627

Observa-se que, para os três os casos, foram obtidos resultados muito satisfatórios para as simulações. Os valores da função objetivo após 100 iterações são bem pequenos, o que comprova que houve convergência e que o comportamento dinâmico da placa do modelo direto é o mesmo comportamento da placa calculada pelo LA.

Observando os valores das variáveis x , y e r , nota-se que os valores são bem próximos dos esperados, na média, afirmando a exatidão do LA. O desvio padrão em todas as variáveis também foi muito satisfatório, demonstrando que, apesar da aleatoriedade, o LA fornece dados precisos. A resposta visual dos resultados pode ser observada nas Fig. 3, 4 e 5, onde foram plotados os resultados de cada iteração junto com o objetivo de cada simulação.

Além dos resultados numéricos, obtém-se também os tempos totais de simulação. Esse parâmetro é importante para determinar a necessidade de recursos computacionais durante a utilização do LA. Na Tab. 7 pode-se observar os tempos totais de simulação para todos os testes efetuados neste trabalho. Vale ressaltar que o tempo de simulação varia bastante, com a maioria dos valores próximos de uma faixa de 4 até 29 horas. A máquina utilizada conta com processador *Intel® Core i5-8250U* 1,6GHz, 8GB DDR4 e placa gráfica *NVIDIA® GeForce® 930MX* 2GB GDDR5.

Tabela 7. Tempo de simulação para os testes executados.

Variáveis	Tempo [horas] ($r = 8\text{mm}$)	Tempo [horas] ($r = 6\text{mm}$)	Tempo [horas] ($r = 3\text{mm}$)
#1	13,3	28,9	4,7
#2	26,8	18,4	7,2
#3	13,3	13,4	6,7
#4	21,6	26,3	7,3
#5	17,9	28,8	7,1
#6	13,4	28,9	6,8
#7	13,3	19,5	6,3
#8	25,8	7,5	6,7
Média	18,2	21,5	6,6

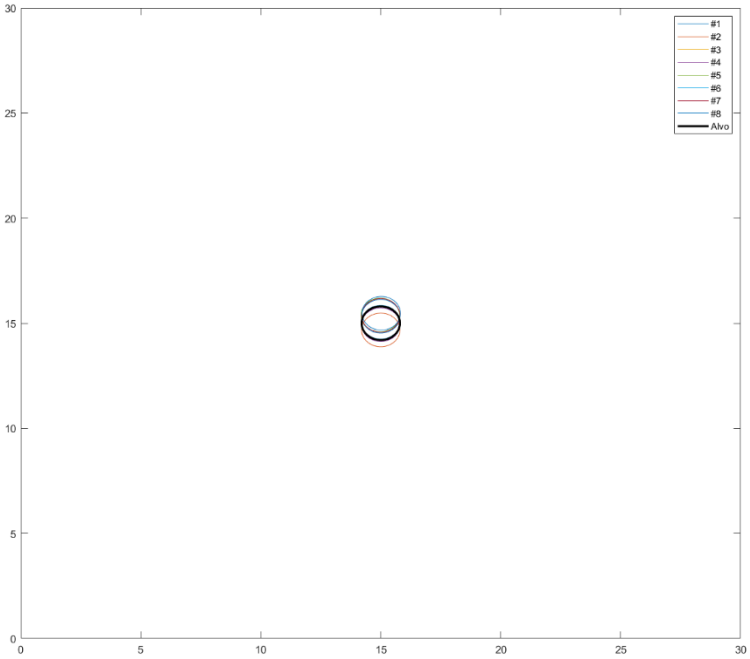


Figura 3. Visualização gráfica dos resultados da simulação para $r = 8\text{mm}$.

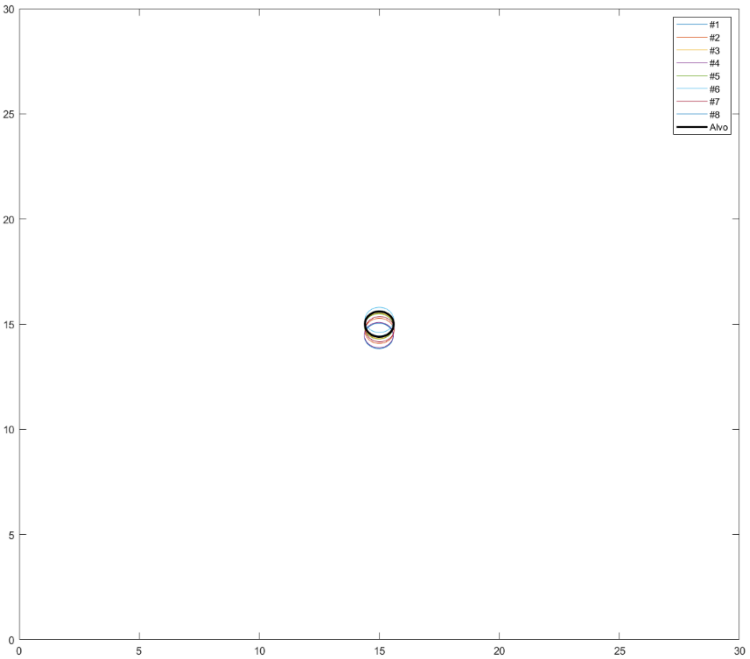


Figura 4. Visualização gráfica dos resultados da simulação para $r = 6\text{mm}$.

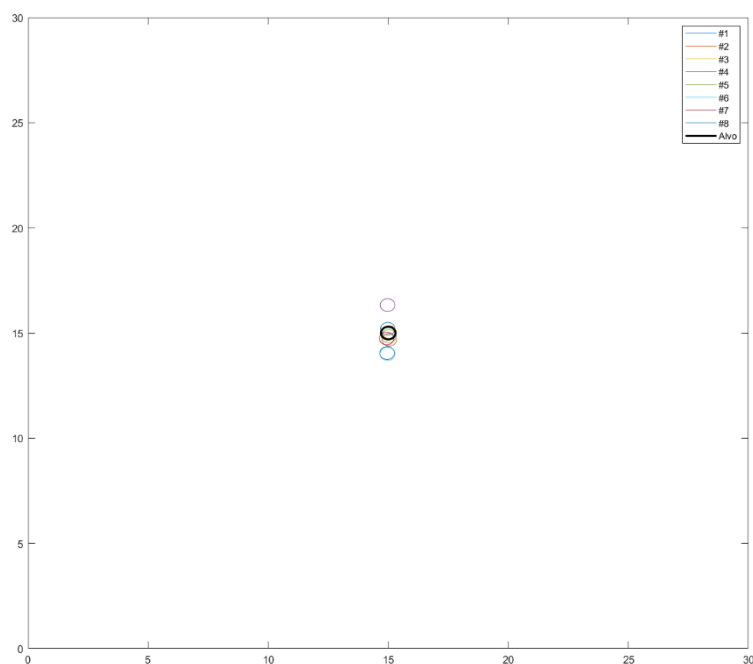


Figura 5. Visualização gráfica dos resultados da simulação para $r = 3\text{mm}$.

5. CONCLUSÕES

Com base na análise dos resultados, observa-se que o *Lichtenberg Algorithm* foi eficaz na funcionalidade proposta para este trabalho. Apesar da necessidade de algumas adaptações no modelo MEF e no código do LA, o algoritmo se mostrou eficiente quando aplicado na análise do comportamento vibracional das estruturas, já que as simulações foram executadas sem erros de operação e convergiram satisfatoriamente.

A aplicação do LA na detecção e caracterização de furos circulares teve um ótimo desempenho, independente da dimensão dos furos, uma vez que os resultados das simulações executadas foram muito próximos dos parâmetros reais. Vale notar que as simulações de furo de raio 8mm obtiveram resultados ligeiramente melhores quando comparados as simulações de furo de raio 6mm e 3mm, porém pode-se considerar os resultados dos furos menores como satisfatórios. Essa diferença se deve ao fato de que um furo maior implica em uma alteração maior das propriedades físicas e comportamento dinâmico da placa, fazendo com que a identificação do dano seja executada de maneira mais eficiente. O algoritmo depende somente dos seus parâmetros para ter maior ou menor sensibilidade. Os parâmetros utilizados neste trabalho são similares aos utilizados em outras aplicações do LA e demonstraram, novamente, a precisão do algoritmo.

Mesmo com os ótimos resultados alcançados, vale ressaltar que o LA apresenta variação na sua eficiência, uma vez que a qualidade dos resultados está diretamente ligada aos parâmetros de entrada e otimização do algoritmo. O parâmetro de população é o que apresenta a maior influência no algoritmo, uma vez que um aumento desse parâmetro certamente trará melhores resultados, porém com um custo computacional maior. Assim, levando em conta a configuração da máquina utilizada, deve-se avaliar a viabilidade na alteração dos parâmetros de otimização.

Considerando a aplicação do LA no monitoramento de integridade estrutural, os resultados das simulações foram muito satisfatórios. Os valores médios calculados para a posição e dimensão dos furos foram muito próximos aos valores reais. Sendo assim, é possível identificar e caracterizar furos em estruturas e utilizar outros métodos para avaliar o impacto desse dano na integridade estrutural. Assim, o LA pode ser usado para determinação da troca da parte da estrutura danificada por um furo.

Outro ponto importante observado nesse trabalho é a utilização de uma estrutura composta de materiais metálicos distintos dispostos lateralmente. Os resultados satisfatórios obtidos nas simulações mostram que o LA pode ser usado na identificação de danos em situações onde se tem vários materiais diferentes interagindo entre si.

Quando comparado a outros métodos aplicados em SHM (como o algoritmo genético e o *sunflower optimization*), o LA apresenta uma praticidade e eficiência superiores, demonstrado em trabalhos anteriores.

A partir dessas afirmações, pode-se concluir que o LA tem um enorme potencial para ser aplicado em diversas situações encontradas na engenharia. Além da geração de resultados confiáveis, exatos e precisos, o LA ainda tem vantagens práticas, já que pode ser utilizado como ferramenta de monitoramento remoto da integridade estrutural de forma contínua.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos, postumamente, a nossa colega Ana Laura Cezario Israel pela dedicação, paixão e companheirismo demonstrados durante a construção deste trabalho e durante todo a sua linda trajetória na graduação em Engenharia Mecânica na UNIFEI.

7. REFERÊNCIAS

- Bandara, R. P.; Chan, T. H.; Thambiratnam, D. P., 2014. "Structural damage detection method using frequency response functions". *Structural Health Monitoring*, Vol. 13, No. 4, pp. 418-429.
- De Roeck, G., 2019. "Model-Based Methods of Damage Identification of Structures Under Seismic Excitation". In *Seismic Structural Health Monitoring*. Springer, Cham, Switzerland, Vol. 1. p. 237-259.
- Gomes, G. F.; Mendéz, Y. A. D.; Alexandrino, P. S. L.; Cunha Jr, S. S., Ancelotti Jr, A. C., 2018. "The use of intelligent computational tools for damage detection and identification with an emphasis on composites – A review". *Composite Structures*. Vol. 196, p. 44-54.
- Heslehurst, R. B., 2014. *Defects and Damage in Composite Materials and Structures*. CRC Press, New York, USA, 206p.
- Mohan, V.; Parivallal, S.; Kesavan, K.; Arunsundaram, B.; Ahmed, A. K. F.; Ravisankar, K., 2014. "Studies on Damage Detection Using Frequency Change Correlation Approach for Health Assessment". *Procedia Engineering*. Vol. 86, pp. 503-510.
- Pereira, J. L. J., 2020. "Desenvolvimento e Aplicação do Algoritmo de Espectros de Lichtenberg em Otimização de Sistemas Mecânicos". Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brazil, 141 p.
- Pereira, J. L. J.; Francisco, M. B.; Cunha Jr, S. S.; Gomes, G. F., 2021b. "A powerful Lichtenberg Optimization Algorithm: a damage identification case study". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 97, p. 104055.
- Pereira, J. L. J.; Chuman, M.; Cunha Jr, S. S.; Gomes, G. F., 2021a. "Lichtenberg optimization algorithm applied to crack tip identification in thin plate-like structures". *Engineering Computations*, Vol. 38, p. 151-166.
- Stepinski, T.; Uhl, T.; Staszewski, W., 2013. *Advanced Structural Damage Detection: From Theory to Engineering Applications*. Wiley, Hoboken, USA, 328 p.
- Yang, X.-S., 2020. *Nature-Inspired Optimization Algorithms*. Academic Press, London, UK, 310 p.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DAMAGE IDENTIFICATION IN STRUCTURES COMPOSED OF DIFFERENT MATERIALS

Ricardo Domingos Abreu Junior, ricardo.jr@unifei.edu.br¹
Ana Laura Cezario Israel, marli.israel@yahoo.com.br¹
João Luiz Junho Pereira, joaoluizjp@unifei.edu.br¹
Benjamin Valkenborgh, benjamin.valkenborgh@condorcet.be²
Sebastião Simões da Cunha Junior, sebas@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá

²CONDORCET – Hainaut Provincial High School

Abstract. The identification of structural damage is very important to ensure the correct and safe use of a given mechanical system. However, some traditional methods of damage detection are expensive and limited, which makes their use impractical. In this context, structural health monitoring methods that use optimization meta-heuristics appear as a viable and more efficient alternative. This work presents a study of detection of circular holes in a thin composite plate constituted by two different metallic materials, through the use of the Lichtenberg Algorithm, a meta-heuristic that uses Lichtenberg Figures, and aims to study the efficiency of the algorithm during the detection of damage in mechanical structures. Using a combination of finite element method with intelligent computational algorithms, the damage detection problem is treated as an inverse problem. The test structure, obtained using the Finite Element Method, is a thin square composite board (30×30cm), and the structural damage (central hole) of the structure has radii that vary between 3, 6 and 8mm. The damage identification was based on the vibrational behavior of the plate, comparing the result suggested by the algorithm and the known data of the direct method. According to the data obtained, it is concluded that the methodology and tools employed offer satisfactory levels of damage detection for the three proposed conditions. The algorithm allowed the identification and characterization of the circular holes in the plates of metallic materials, being these details essential for the study of the impact of the damage in the conditions of use of the structure. In addition, the method has notable advantages such as remote and continuous monitoring of the health of the structure, bringing savings in time and maintenance costs.

Keywords: Damage Identification, Structural Health Monitoring, Optimization Meta-heuristics, Lichtenberg Algorithm.