

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DETECÇÃO DE DANOS EM MATERIAL COMPÓSITO LAMINADO CONSIDERANDO OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO E ALGORITMOS GENÉTICOS

Guilherme Ferreira Gomes, guilhermefergom@unifei.edu.br¹

Sebastião Simões Cunha Jr, sebas@unifei.edu.br¹

Antônio Carlos Ancelotti Jr, ancelotti@unifei.edu.br¹

¹Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, Itajubá-MG, Brasil

Resumo: Estruturas de difícil manutenção e acesso necessitam ter como aliado um processo de monitoramento de sua integridade estrutural. Tal monitoramento por meio de estudos de detecção de danos está presente em diversas aplicações da engenharia uma vez que possibilitam que medidas corretivas sejam aplicadas para garantir a segurança estrutural de uma dada máquina e/ou equipamento. Neste trabalho, desenvolveu-se um estudo, via simulações numéricas, a fim de avaliar técnicas de detecção de danos aplicadas a materiais compósitos, pois a aplicação destes materiais em componentes e estruturas vêm substituindo os materiais metálicos devido a sua alta performance mecânica. Este trabalho de pesquisa será baseado na resolução do problema direto e inverso, combinando dados de um modelo e dados experimentais simulados com intuito de detecção de danos. Realizou-se a modelagem por meio do método de elementos finitos e empregou-se técnicas heurísticas de otimização de modo a minimizar determinadas funções objetivo, escritas em função de parâmetros dinâmicos da estrutura analisada. A estrutura estudada constitui-se de um laminado de fibra de carbono e dois modelos de danos foram adotados: (a) um único furo circular e (b) múltiplos danos na forma de furos circulares. Os resultados dos algoritmos de otimização empregados em conjunto ao modelo em elementos finitos apresentaram boa eficácia na detecção de danos estruturais.

Palavras-chave: Detecção de Danos, Algoritmos Genéticos, Frente de Pareto, Vibrações, Materiais Compósitos.

1. INTRODUÇÃO

A existência de estruturas de difícil manutenção, acesso restrito ou como no caso de estruturas espaciais, que devem funcionar com pequenas margens de variação dinâmica, necessitam ter como aliado um processo de monitoramento de sua integridade estrutural. Tal monitoramento tenta detectar regiões fragilizadas em uma fase inicial para, assim que for possível, permitir que providências adequadas possam ser tomadas rapidamente, garantindo uma sobrevida e segurança estrutural maior (Borges *et al.*, 2004).

Um determinado tipo de dano estrutural pode ser caracterizado como a presença de furos, trincas e outras irregularidades que conduzem uma mudança nas propriedades estruturais de massa, rigidez ou amortecimento da estrutura em questão. Segundo Doebling *et al.* (1996), o interesse na capacidade de monitorar uma estrutura e detectar danos na fase mais precoce possível permeia os ramos de engenharia mecânica, aeroespacial e civil. A grande maioria dos métodos de detecção de danos atuais são visuais ou métodos experimentais localizados tais como métodos acústicos ou ultrassom, partículas magnéticas, radiografias, métodos correntes parasitas e outros. Todas estas técnicas experimentais exigem que a vizinhança do dano seja conhecida a priori e que a estrutura a ser inspecionada esteja facilmente acessível. A necessidade de métodos adicionais de detecção de danos globais que podem ser aplicados a estruturas complexas conduziu ao desenvolvimento de métodos que examinam as alterações nas características de vibração da estrutura. A ideia básica é que os parâmetros modais (frequências naturais, modos de vibração e amortecimento modal) são funções das propriedades físicas da estrutura (massa, amortecimento e rigidez). Portanto, as alterações nas propriedades físicas causarão alterações das propriedades modais.

Segundo Heslehurst (2014), a aplicação de materiais avançados, como materiais compósitos, em componentes e estruturas evoluiu devido à necessidade de se reduzir peso e melhorar o desempenho estrutural. Outros atributos de materiais compósitos, como a resistência à corrosão, excelente acabamento superficial, a boa capacidade de resistência a fadiga e elevado desempenho estrutural, também têm sido contribuições significativas para o rápido aumento da aplicação desses materiais. Contudo, materiais compósitos são submetidos a altas solicitações estruturais devido a sua performance,

o que acarreta providências à critérios específicos de danos. No entanto, a avaliação da criticidade dos defeitos e danos em materiais compósitos, além das exigências de reparo subsequentes são atualmente um desafio. A maioria das técnicas de inspeção não destrutivas utilizadas em compósitos exigem elevados níveis de experiência dos operadores para sua realização com sucesso e posterior interpretação de resultados, vindo deste impasse o interesse pela detecção de danos como monitoramento da integridade estrutural em tais materiais.

Neste trabalho, lançou-se mão do método de elementos finitos devido à complexidade da análise de um material anisotrópico (compósito de fibra de carbono) com várias camadas de material laminado, o que não se adaptaria utilizando os métodos de contorno que são amplamente utilizados para estruturas com simplificação bidimensional. Métodos heurísticos de otimização, como o algoritmo genético (AG), são utilizados como o procedimento de otimização por conseguirem encontrar um ótimo global com eficiência e não ficar preso em um ótimo local, possibilitando localizar apropriadamente o dano, além da não necessidade de avaliação de derivadas da função objetivo, o que pode se tornar um problema para casos onde descontinuidades possam estar presentes. As rotinas de otimização de detecção de danos foram feitas com auxílio do software MATLAB® trabalhando em paralelo com o software comercial de elementos finitos ANSYS® para resolução dos problemas direto e inverso.

2. DETECÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS BASEADO EM PARÂMETROS DINÂMICOS

O monitoramento da integridade estrutural ou *Structural Health Monitoring* (SHM) tem como objetivo dar, a cada momento durante a vida de uma estrutura, um diagnóstico do "estado" de seus constituintes, das diferentes partes e do conjunto completo dessas peças que constituem a estrutura como um todo. O monitoramento estrutural é uma maneira nova e melhorada para fazer uma avaliação não destrutiva, envolvendo a integração de sensores, possivelmente materiais inteligentes, transmissão de dados de poder computacional e capacidade de processamento dentro das estruturas. Isso torna possível a reconsideração da concepção da estrutura e a gestão integral da própria como uma parte de sistemas mais amplos (Balageas *et al.*, 2006).

Ter o acompanhamento da integridade estrutural de estruturas em serviço em uma base contínua de tempo real é um objetivo muito importante para os fabricantes, usuários finais bem como equipes de manutenção. Com efeito, o SHM: permite uma utilização ótima da estrutura, um tempo de inatividade minimizado, e a prevenção de falhas catastróficas dá ao engenheiro uma melhoria em seus produtos e melhora drasticamente para melhor a organização do trabalho dos serviços de manutenção. Uma das alternativas para contornar esse problema do monitoramento da integridade estrutural consiste no uso de métodos inversos para detecção de danos. O método de detecção de dano estrutural baseando-se em métodos inversos combinam um modelo inicial de estrutura e dados experimentais, sejam para melhorar o modelo ou testar uma hipótese. Na prática, segundo Friswell *et al.* (1998), o modelo é baseado na análise de elementos finitos e os dados experimentais são dados em forma de aceleração e força, muitas vezes sob a forma de uma base de dados modal, embora a função de resposta em frequência (FRF) de dados também possa ser utilizada.

Os quatro níveis da estimativa de danos, primeiramente abordadas por Rytter (1993), são estabelecidos como a detecção, localização, quantificação e prognóstico. A detecção é prontamente realizada por meio de métodos de reconhecimento de padrões ou detecção de novas mudanças estruturais. A questão-chave para os métodos inversos é a localização, o que equivale a localização de erro no modelo. Uma vez que o dano é localizado, ele pode ser parametrizado com um conjunto limitado de parâmetros e quantificados. Uma das principais formas de se avaliar a presença de um dano local é se basear na variação dos parâmetros dinâmicos estruturais. Essa metodologia parte do pressuposto de que os danos acarretam alterações nas propriedades da estrutura, ou seja, podem acarretar a uma variação nas matrizes de massa, amortecimento e rigidez na equação clássica de movimento de um corpo, o que consequentemente acarretará modificações nas respostas dinâmicas da mesma, como por exemplo, frequências naturais, modos de vibração e amortecimento modal.

2.1. Mudança nas Frequências Naturais

A mudança das frequências naturais pode ser considerada como um método de detecção de danos prevalente nos procedimentos de avaliação estruturais. Quando um dano existe em uma estrutura, a rigidez estrutural e/ou a massa do corpo são modificadas e consequentemente, promovendo uma alteração nas frequências naturais do sistema em questão. Uma das maiores vantagens desta técnica de detecção é que as medições de frequência pode ser rapidamente e facilmente realizada. Além disso, as técnicas experimentais utilizadas para a determinação das frequências naturais são técnicas clássicas de medição de vibração clássicas. O conhecimento do comportamento dinâmico global de sistemas não danificados é muito fácil de obter usando desenvolvimentos analíticos ou modelos de elementos finitos, permitindo, assim, os pontos de medição a ser adequadamente escolhido para não só uma detecção rápida e eficiente das alterações em frequências, mas também a identificação da localização e gravidade danos (Sinou, 2009).

Um critério de detecção de danos comumente conhecido da literatura, sendo composto exclusivamente por um conjunto de n frequências naturais é o DLAC (*Damage Location Assurance Criterion*), que compara as frequências obtidas experimentalmente com um modelo de elementos finitos para localizar e quantificar um dano. O DLAC calcula a correlação entre as variações de frequências, $\{\Delta\omega\}$, prevista a partir do modelo de elementos finitos e as mudanças reais, $\{\delta\omega\}$ estimadas a partir de procedimentos experimentais (Sohn, 2004).

$$DLAC = \frac{|\{\Delta\omega\}^T \{\delta\omega\}|}{(\{\Delta\omega\}^T \{\Delta\omega\})(\{\delta\omega\}^T \{\delta\omega\})} \quad (1)$$

O DLAC assume o valor de 1 para uma correspondência exata entre os conjuntos de frequências naturais e 0 para os padrões não correlacionados. Este método DLAC só exige a medição de algumas frequências entre os estados não danificados e danificados da estrutura. A precisão das previsões de danos pode ser ainda melhorada pela inclusão das frequências de anti-ressonâncias no critério. Na aplicação, um valor DLAC de 0,9 (90%) seria considerada boa correlação entre o modelo e a estrutura real, valores superiores a 0,9 são considerados semelhantes e valores abaixo de 0,9 representam dados dinâmicos que são significativamente diferentes (Ewins, 2000).

3. MODELAGEM

A modelagem do problema de detecção de danos abordado neste trabalho foi formulada em duas frentes: a modelagem do problema direto, modelada por meio do método dos elementos finitos e da modelagem do problema inverso, se consistindo do método de otimização para a busca das variáveis de projeto ótimas para a identificação do dano estrutural imposto.

3.1. Problema Direto: Modelagem por Elementos Finitos

Modelos de elementos finitos possuem a informação a priori disponível sobre os modelos contínuos, o comportamento do material e das restrições internas. A resposta a uma determinada excitação, modelado por um modelo de elementos finitos, é regida por um conjunto de coeficientes que estão estritamente relacionados às grandezas físicas, tais como, os coeficientes da matriz de massa ou rigidez, que representam os parâmetros de tais modelos. (Friswell, 2008)

Os valores ótimos a serem calculados são determinados de modo a minimizar a diferença entre os valores de resposta medidos (real) e previstos (simulado). A identificação do modelo de elemento finito de uma estrutura continua passa a ser um objetivo importante da identificação estrutural, tal como é tipicamente utilizado em problemas diretos. Por outro lado, é o modelo popularmente conhecido capaz de fornecer informação local sobre as propriedades estruturais, que é crucial para a detecção de danos (Morassi e Vestroni, 2008).

O problema direto foi modelado como uma placa quadrada de lado igual a um metro, ou simplesmente pode-se levar em conta o valor de uma unidade, pois essa dimensão não é relevante para o processo de otimização. A estrutura se constitui de um laminado simétrico de material compósito constituída de 4 camadas de diferentes orientações. O laminado possui dimensões de um quadrado da unidade de um metro de lado. As espessuras de camadas são todas de 0,0025 m orientados de maneira simétrica [0/90]s. Salienta-se que este trabalho visa exclusivamente o estudo do método de detecção de danos em laminados de material compósito usando algoritmos de otimização, não dando ênfase nos parâmetros geométricos e características específicas do material laminado.

Antes de engrenar o modelo, e até mesmo antes de construí-lo, é importante decidir sobre o tipo de malha livre e mapeada apropriado para a análise. Uma malha mapeada tipicamente tem um padrão regular, com elementos ordenados, permitindo um maior controle sobre os elementos, porém demanda maior tempo e esforço computacional para geração destes. Sendo assim, tomou-se elementos de casca gerados livremente sobre a superfície estrutural. A Fig.1 mostra o resultado gráfico da modelagem do laminado de geometria quadrada, com malha livre (neste caso sem presença de dano, a malha foi uniforme devido à simetria e simplicidade da estrutura), gerados na superfície da estrutura estudada.

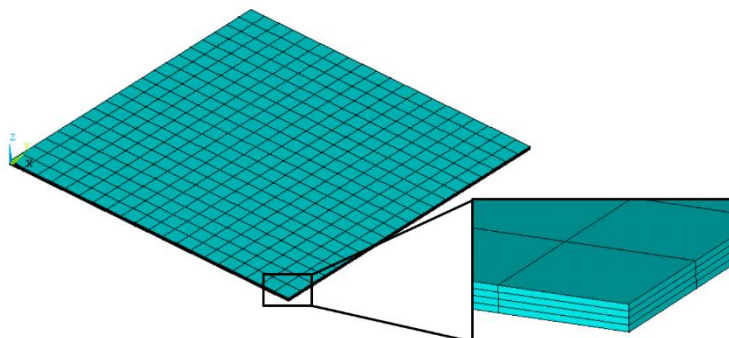


Figura 1. Modelagem da placa laminada em elementos finitos.

3.1.1. Modelos de danos adotados

Dois modelos de danos são abordados neste estudo. O primeiro dano a ser considerado consiste de um furo circular, que por sua vez é parametrizado segundo três variáveis, que são também conhecidas como as variáveis de projeto no

processo de busca em otimização. Estas variáveis são dadas pelas posições cartesianas x e y na placa, sendo a posição do centro do furo, e pelo raio r do mesmo. Logo, tem-se um vetor α , denominado vetor de variáveis de decisão dado por $\alpha = \{x, y, r\}$. Para este primeiro modelo de dano, considerou-se um furo circular de 2 centímetros de raio. O modelo de dano circular é um modelo robusto, podendo ser interpretado como um furo por si só ou por corrosão onde houve perda localizada de material e de rigidez. Outras interpretações podem ser dadas para este modelo, mas o objetivo do modelo adotado é de intervir sobre as características físicas estruturais (massa, rigidez e amortecimento) do compósito em questão. Para o segundo caso de estudo, o dano foi modelado com a presença de múltiplos furos circulares, seguido pela combinação destes em posições idênticas ao modelo anterior, um na posição central da placa e outro deslocado da centralidade (Fig. 2). A parametrização do dano se dá pela sua posição em relação aos eixos cartesianos x e y e pelo seu raio, logo as variáveis de decisão neste caso será o n vezes maior em relação ao modelo anterior, pelo fato do acrescentar n danos à estrutura. Portanto, as variáveis de decisão se agrupam em um vetor α dado por $\alpha = \{x_1, y_1, r_1, x_2, y_2, r_2\}$, sendo os índices 1 e 2 referentes ao dano 1 e 2, respectivamente. Para este segundo modelo de dano, precisou-se acrescentar uma equação de restrição para a função objetivo a ser minimizada. A equação de restrição elaborada orienta o algoritmo de otimização a não gerar furos aleatórios de mesma concentricidade e/ou sobrepostos, ou seja, permitindo então a busca por múltiplos danos distantes entre si.

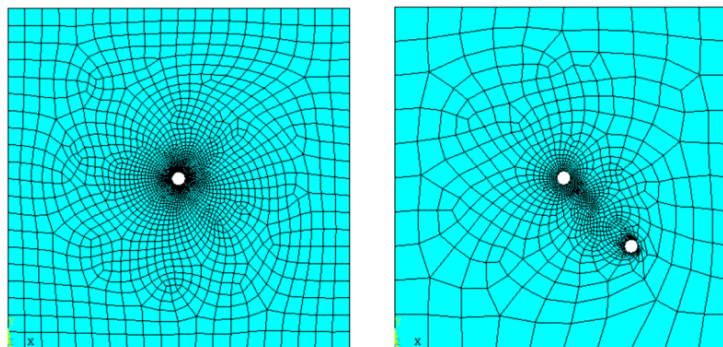


Figura 2. Modelos de danos adotados.

3.2. Problema Inverso: Otimização por Algoritmos Genéticos

Encontrar a melhor solução para um determinado problema é uma importante área de pesquisa e possui aplicação em diversos campos da engenharia. Diversos problemas de otimização podem ser identificados na área de monitoramento da integridade estrutural (SHM). Como mencionado nos parágrafos anteriores, para a solução de problemas de detecção de danos em que a localização do dano e sua quantificação são parâmetros a serem determinados, são necessários dados correspondentes à resposta vibratória da estrutura em estudo. A resposta vibratória pode ser obtida por meio dados oriundos de sensores, transmitidos até uma unidade de processamento, que por fim determina a localização e extensão do dano com uso de algoritmos específicos (Fig. 3). Neste trabalho serão considerados dados experimentais (simulados de um caso real de uma estrutura danificada) e informações relacionados às frequências naturais da estrutura real danificada e do modelo para uma primeira função objetivo e para uma segunda função, acrescenta-se a aquisição de dados referentes às acelerações da placa correspondente à vibração de uma determinada frequência natural.

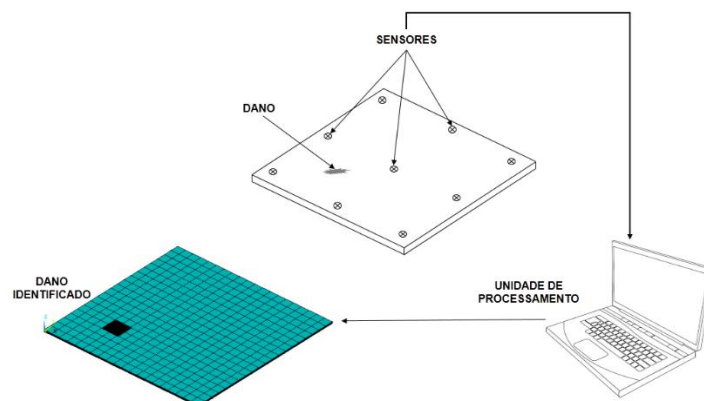


Figura 3. Método inverso de detecção de danos baseado em modelo com unidade de processamento.

A primeira função objetivo J_1 , baseia-se na raiz do erro quadrado médio (*Root Mean Square Error* – RMSE) das primeiras n frequências naturais da placa. A minimização desta função objetivo sugere que as frequências naturais da placa danificada real serão iguais às frequências obtidas pela otimização, ou seja, o seu valor mínimo será igual zero ($J_1 = 0$). Contudo, visando uma melhoria do processo de detecção de danos, é imprescindível que se trabalhe com uma função objetivo adequada, visando menor tempo computacional e melhor identificação. Segundo Jakharfani e Masri (2011), a seleção de parâmetros é uma questão-chave nos processos de otimização. A confiança em diferentes valores de teste de medição de parâmetros e estimativas iniciais podem ser expressas por meio de ponderações na função objetivo. Fatores de ponderação (pesos) adequados podem melhorar a resultados de otimização de forma significativa. No entanto, isso requer uma boa dose de conhecimento sobre as premissas utilizadas na modelagem de elementos finitos do sistema, bem como as possíveis fontes de erro na análise. Os métodos de detecção de danos, que levam em consideração frequências naturais de ordem mais altas são mais confiáveis. Portanto, na função objetivo J_1 , toma-se um vetor peso C composto por escalares c_i de ordem crescente, $C = \{1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\}$, com o intuito de dar maior importância a frequências de ordem mais altas.

$$J_1 = \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \left(1 - \frac{\omega_i^{\text{real}}}{\omega(\alpha)_i^{\text{modelo}}} \right)^2} \quad (2)$$

Sendo n o número de frequências naturais obtidas, c_i o escalar de ponderação para frequências naturais de ordem mais alta, ω_i^{real} as frequências naturais correspondente à estrutura danificada real e $\omega(\alpha)_i^{\text{modelo}}$ as frequências naturais da estrutura modelada em elementos finitos, composta por um ou mais danos, parametrizados segundo um vetor de variáveis de projeto α .

Sabe-se que danos pequenos não afetam significativamente as alterações nas respostas que regem o comportamento estrutural e, portanto, com tais danos em vários locais de uma estrutura são difíceis de detectar utilizando métodos de detecção de danos tradicionais com base em propriedades modais. Um método de detecção com maior eficiência para detecção de múltiplos danos é o uso de otimização. Segundo o autor, uma das desvantagens de otimização tradicional para detectar danos estruturais com base em parâmetros modais é que não há um bom desempenho usando vários índices de dano. Quando frequências naturais ou modos de vibração são usados como os índices de danos na função objetivo a ser minimizada, são escolhidos diferentes fatores de ponderação para cada modo ou frequência natural. No entanto, quando se minimiza a função objetivo, não é fácil escolher tais fatores de ponderação razoáveis para cada membro da função, porque não se sabe a importância relativa da frequência e dos modos para o problema de detecção de dano específico. Portanto, não é garantido que a função objetivo com valores menores sempre ofereçam as melhores soluções (Cha, 2015). Desta forma, uma terceira função objetivo J_2 é abordada neste trabalho com objetivo principal de contornar estes problemas relatados.

$$J_2 = \left[\text{MIN} \left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \left(1 - \frac{\omega_i^{\text{real}}}{\omega(\alpha)_i^{\text{modelo}}} \right)^2} \right), \text{MIN} \left(\sum_{i=1}^n \left(\ddot{x}_i^{\text{real}} - \ddot{x}(\alpha)_i^{\text{modelo}} \right)^2 \right) \right] \quad (3)$$

Sendo n o número de frequências naturais obtidas, c_i o escalar de ponderação para frequências naturais de ordem mais alta, ω_i^{real} e $\ddot{x}_i^{\text{real}}$ as frequências naturais e acelerações correspondentes à estrutura danificada real e $\omega(\alpha)_i^{\text{modelo}}$ e $\ddot{x}(\alpha)_i^{\text{modelo}}$ as frequências naturais e acelerações da estrutura modelada em elementos finitos, composta por um ou mais danos, parametrizados segundo um vetor de variáveis de projeto α .

O método de detecção elaborada neste trabalho, de maneira sucinta, será realizado em dois passos. O primeiro passo, de detecção de danos, combinará dados de uma estrutura modelada em elementos finitos, sem danos e uma estrutura modelada com dano previamente conhecido, que simulará o caso de uma estrutura real danificada. Este primeiro passo empregará o critério DLAC para detectar se existe ou não a presença de um dano. O segundo passo é o processo de identificação de dano. Nesta rotina de identificação o algoritmo de otimização é introduzido para efetuar a busca do dano na geometria da estrutura, havendo interação entre o software de elementos finitos onde o modelo da estrutura é adaptado para receber as variáveis de projeto e o software de otimização que realizará uma série de cálculos a fim de gerar dados de entrada para o software de elementos finitos. O fluxograma da Fig. 4 exibe passos a serem realizados durante a busca pelo dano. O método de detecção de danos neste estudo atende três dos quatro critérios proposto por Rytter (1993), a detecção, localização e a quantificação do dano (modelos de danos estudados).

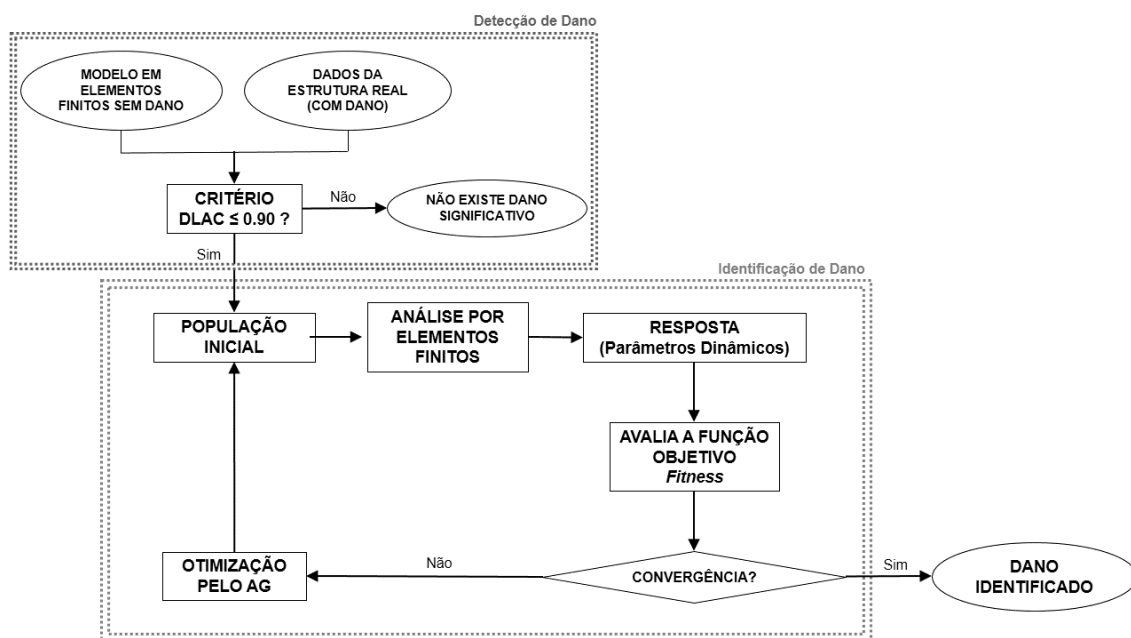


Figura 4. Fluxograma do processo de detecção de danos.

O algoritmo genético, por se tratar de um método heurístico, consegue encontrar com mais facilidade os pontos de ótimos globais, não se prendendo aos mínimos locais, pois não depende da escolha de um ponto inicial, nem do conhecimento de derivadas da função, sendo um processo puramente probabilístico. Para que o algoritmo possa se diversificar e manter determinadas características ótimas de busca, deve-se definir valores específicos para seus operadores genéticos. Um dos parâmetros a se escolher no processo de otimização se refere à população inicial de indivíduos utilizados como pontos iniciais de avaliação do método. A escolha desses indivíduos nesse estudo foi efetuada de um caráter puramente aleatório, respeitando as equações de restrição impostas e o limite das variáveis de projeto. Os operadores genéticos foram escolhidos após a realização de vários processos de detecção, até que um conjunto de valores mais satisfatório fosse obtido, de modo a ser mais eficiente o processo inverso de detecção de danos. Os valores para os operadores genéticos utilizados são mostrados na Tab.1.

Tabela 1. Operadores genéticos.

Operador	Valor
População	300 indivíduos
Cruzamento	60%
Mutação	20%
Elitismo	2

4. RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÃO

Para a parte inicial do problema inverso de detecção de danos, necessitou de um estudo correto da modelagem do problema direto por meio do método de elementos finitos para que se tenha confiança adequada nos resultados gerados pelo método de elementos finitos, não apenas efetuando um tratamento de dados para o problema inverso de otimização, tendo como motivação a aplicação futura deste método como monitoramento real de estruturas em serviço. A principal hipótese levantada neste trabalho é que a presença de um dano estrutural, seja ele modelado como um furo, múltiplos furos ou uma trinca, gera uma variação das matrizes de massa, rigidez e amortecimento. Respostas dinâmicas estruturais, como frequências naturais, modos de vibração e aceleração são diretamente dependentes de tais matrizes, pois são obtidas a partir da equação de movimento, logo a presença de um dano arbitrário gerará uma resposta diferente daquela onde um dano não se encontra presente em uma determinada estrutura. Os resultados numéricos obtidos em uma placa intacta e com um dano modelado como um orifício circular no centro da placa exibem a diferença de repostas quando se insere um dano, resultado da interferência destes nas matrizes estruturais (Fig. 5).

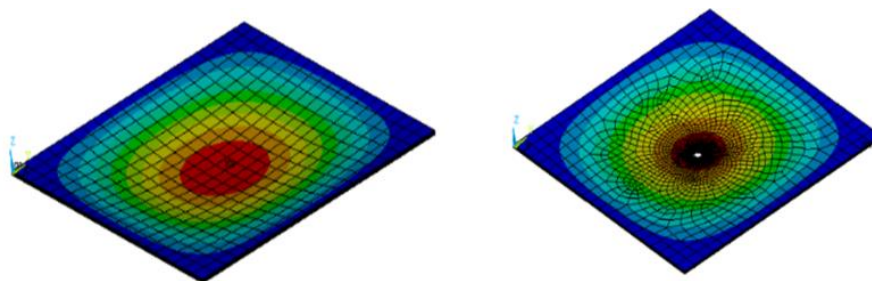


Figura 5. Variação das frequências naturais com a presença de um dano estrutural. Placa sem presença de dano com frequência fundamental de 41,7760 Hz (imagem à esquerda) e na presença de dano com frequência de 37,1599 (imagem à direita).

4.1. Um Furo Circular

Os valores obtidos para três simulações simultaneamente realizadas para detecção de um dano centralizado são exibidos na Tab. 2. Pelo fato de técnica de otimização utilizada se tratar de um método heurístico, é interessante que se obtenha uma média de várias simulações, pois o método se baseia em um sistema de buscas aleatórias (probabilísticas). Pode-se observar que o método detectou com eficácia o dano com um erro baixo e de caráter completamente aceitável (Tab. 2 e Fig. 6). Para todos os casos simulados notou-se que o raio é a variável de projeto com menor sensibilidade na busca, que de fato frequências naturais como critério de detecção de danos são bons parâmetros para verificar a presença de um dano, mas ainda possui limitações em quantificar e prever a extensão do dano estrutural. Contudo, os resultados das simulações numéricas mostram que o algoritmo desenvolvido obteve boa precisão em identificar a presença de um furo circular relativamente pequeno na estrutura em questão. A terceira variável de projeto (raio do furo) demonstrou-se como a menos propensa à identificação, assumindo os maiores erros, mas não afetando o resultado geral na busca pelo dano de modo crucial.

Tabela 2. Resultado para detecção de dano (furo central).

	x	y	r
Objetivo	0,5000	0,5000	0,0200
Busca 1	0,5029	0,5091	0,0194
Busca 2	0,5132	0,5179	0,0234
Busca 3	0,4768	0,4991	0,0215
Média	0,4976	0,5087	0,0214
Desvio	0,0187	0,0094	0,0020
Erro [%]	0,4733	1,7400	7,1677

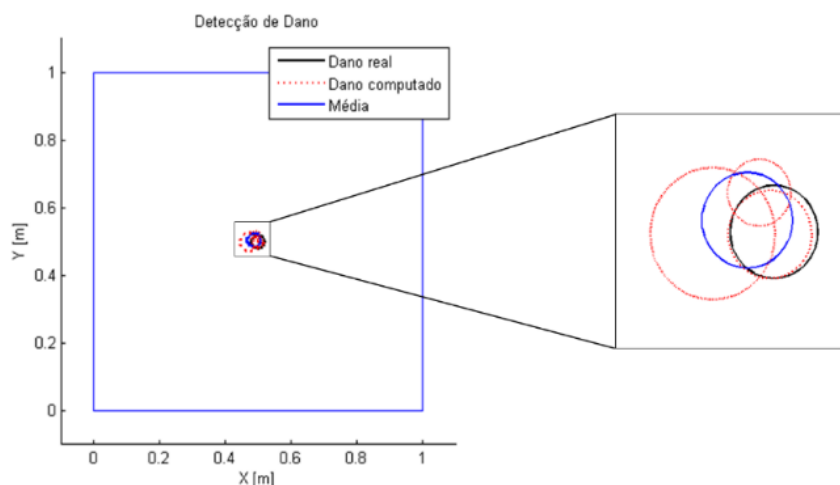


Figura 6. Detecção de danos modelados como furos circulares em uma posição centralizada

4.2. Múltiplos Danos Estruturais

Um dos desafios enfrentados de relevância neste trabalho é a detecção de múltiplos danos, modelados como furos circulares, parametrizados de modo semelhante ao modelo anterior. A inserção de mais um furo dobra o número das variáveis de projeto utilizados, portanto, trabalhando-se com dois furos, seis variáveis de projeto entrarão em jogo a fim de serem otimizadas pelo algoritmo genético. Um grande esforço computacional foi necessário para esta parte do trabalho, manteve-se todos as constantes dos operadores genéticos como de praxe do caso anterior.

Uma das desvantagens do algoritmo genético para a otimização de um único objetivo como uma abordagem tradicional para detectar danos estruturais com base na função composta por parâmetros modais é não há um bom desempenho quando vários danos são presentes. Por exemplo, critério modais são usados como índices de avaliação de danos, múltiplos modos de vibração ou frequências naturais, são combinados em uma função objetivo com diferentes fatores de ponderação, como efetuado em nas funções objetivos tratados. No entanto, quando tenta-se minimizar uma única função objetivo, não é fácil escolher fatores de ponderação (pesos) razoáveis para cada modo de vibração ou frequência natural, porque não se sabe ao certo de que forma o modo de vibração ou a frequência natural são importantes para um problema de detecção de dano específico. Portanto, não é garantido que a função objetivo com valores menores sempre oferecem as melhores soluções. No entanto, a partir de estudos numéricos comparativos, a abordagem multiobjetivo mostram um desempenho significativamente melhor do que a abordagem tradicional com um único objetivo na detecção de vários danos (Cha e Buyukozturk, 2015).

Os resultados obtidos para esta abordagem multiobjetivo apresentaram um erro global de 7,5%, erro menor do que apresentado no caso onde a ponderação de uma única função objetivo foi feita dando-se pesos aos componentes de frequência e aceleração. A Tab. 3 exhibe resultados obtidos três buscas realizadas e a média calculada a partir destes, mostrada graficamente na Fig. 7.

Tabela 3. Resultado obtido pela otimização multiobjetivo de J_2 .

	x_1	y_1	r_1	x_2	y_2	r_2
Objetivo	0,7000	0,3000	0,0200	0,5000	0,5000	0,0200
Busca 1	0,7429	0,3873	0,0251	0,4472	0,522	0,0269
Busca 2	0,7578	0,3368	0,0221	0,494	0,4801	0,0172
Busca 3	0,7228	0,2826	0,0241	0,4907	0,4641	0,0171
Média	0,7412	0,3356	0,0238	0,4773	0,4887	0,0204
Desvio	0,0176	0,0524	0,0015	0,0261	0,0299	0,0056
Erro [%]	5,8810	11,8556	18,8333	4,5400	2,2533	2,0000

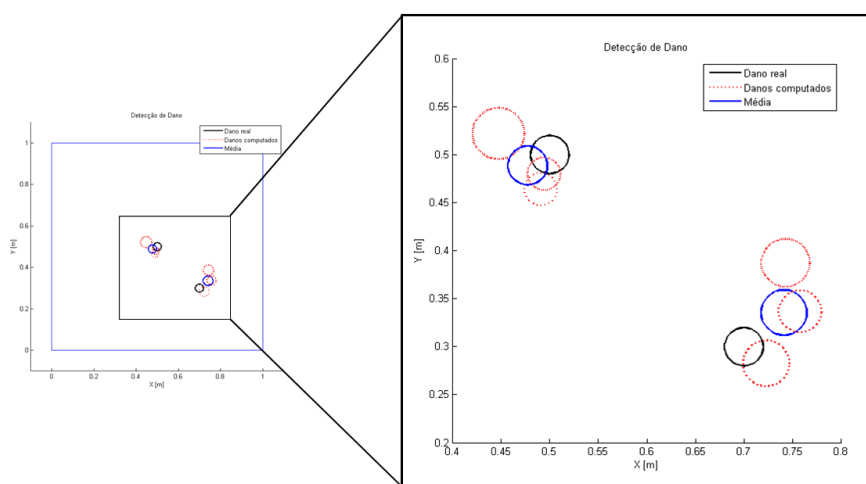


Figura 7. Detecção de múltiplos danos por meio de otimização multiobjetivo.

Lançando-se mão da otimização multiobjetivo para encontrar a solução ótima para detecção de dano, um conjunto de soluções é obtido. Um conjunto de soluções é denominado conjunto Pareto-ótimo se, para cada solução do conjunto, não existe nenhuma outra solução factível capaz de reduzir o valor de um dos critérios do problema sem que simultaneamente cause um aumento em pelo menos um dos demais critérios. Em otimização multiobjetivo, trabalha-se com dois espaços: o espaço de variáveis e o espaço de objetivos. O espaço de variáveis é onde se faz a busca pelas soluções do problema, ou seja, é o domínio das variáveis do problema. Já o espaço de objetivos é o espaço formado pelas funções-objetivo do

problema. A Fig. 8 mostra a Fronteira de Pareto, ou o conjunto de soluções ótimas de Pareto. Os pontos correspondem às soluções não dominadas devido ao fato de que não existem outros pontos que melhorem um objetivo sem degradar o outro, neste caso específico da figura, obteve-se oito soluções ótimas para o problema. O conjunto das soluções não-dominadas é chamado de conjunto Pareto-ótimo, e a imagem de um determinado conjunto Pareto-ótimo, no espaço dos valores dos objetivos, é chamada de fronteira de Pareto (curva vermelha tracejada).

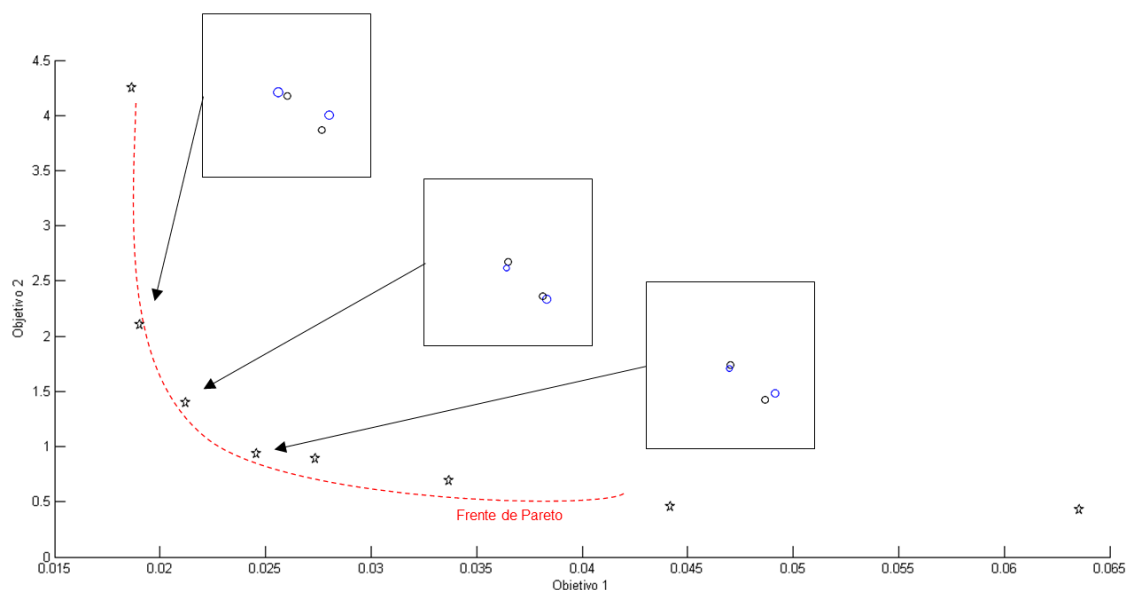


Figura 8. Conjunto de soluções ótimas viáveis com formação da Frente de Pareto.

5. CONCLUSÕES

Vários algoritmos de detecção de danos foram construídos neste estudo, um estudo para modelagem foi feito inicialmente para dar sequência ao problema de detecção literalmente. Deu-se início ao problema de detecção de um dano modelado como um furo circular parametrizado segundo três variáveis de projeto (x, y, r), tendo como análise a otimização de uma função objetivo baseada somente num conjunto das primeiras frequências naturais de vibração, ponderadas segundo escalares específicos. O método dos elementos finitos demonstrou ser uma ferramenta poderosa em solucionar problemas que por muitas das vezes não possuem soluções triviais. Para todos os modelos de danos simulados como furos circulares, o raio do furo demonstrou-se ser a variável de maior dificuldade a ser identificada com precisão. O valor do raio do furo representa neste caso, a extensão do dano estrutural presente no meio (estrutura).

A presença de múltiplos danos estruturais, fez-se com que se abordasse uma outra função objetivo, composta por uma combinação de frequências e acelerações estruturais, sendo tratada por meio de uma otimização multiobjetivo com formação de uma frente de Pareto. Este tipo de otimização constatou ser o melhor método para detecção de múltiplos danos, pois a mesma oferece um conjunto de soluções ótimas viáveis para solucionar o problema inserido, sendo o de nossa escolha aquele de menor distância em relação à origem (zero). O critério de otimização multiobjetivo para formação da frente de Pareto levou em consideração elitismo controlado, o que se mostrou superior à técnica de ponderação de objetivos.

A evolução da capacidade das ferramentas computacionais de modelagem matemática, simulações numéricas além da capacidade de processamento de computadores modernos permitem a aplicação e expansão do método de detecção de danos de maneira cada vez mais precisa e sofisticada, sendo possível a aplicabilidade em estruturas altamente complexas com elevado número de elementos além da capacidade de processamento de um vetor composto por várias variáveis de projeto no processo de otimização com uso de heurísticas globais.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais pelo apoio financeiro recebido.

7. REFERÊNCIAS

- Balageas, D., Fritzen, C., Guemes, 2006, “A Structural Health Monitoring”, ISTE Ltd., ISBN 978-1-905209-01-9.
 Borges, C. C., Barbolsa, F. S., Cury, A. A., 2004, “Detecção de Dano em Estruturas Usando Dados Modais Incompletos”, Recife, PE; 2004; Proceedings of the XXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. CILAMCE.

- Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B., Shevitz, D.W., 1996, "Damage Identification and Health Monitoring of Structural And Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review", Los Alamos National Laboratory Report, LA-13070-MS.
- Ewins, D., 2000, "Modal Testing theory, practice, and application", Hertfordshire: Research Studies Press LTD.
- Friswell, M., Penny, J., Garvey, S., 1998, "A combined genetic eigensensitivity algorithm for the location of damage in structures", Computers and Structures v. 69, pp.547-556.
- Friswell, M. I., 2008, "Damage Identification using Inverse Methods. Dynamic Methods for Damage Detection in Structures", v. 499, pp.13-66.
- Heslehurst, R. B., 2014, "Defects and Damage in Composite Materials and Structures". CRC Press (Boca Raton, FL).
- Jakharfani, R., Masri, S. F., 2011, "Finite Element Model Updating Using Evolutionary Strategy for Damage Detection", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, v. 26, pp.207-244
- Morassi, A. e Vestroni, F., 2008, "Dynamic Methods for Damage Detection in Structures", CISM Courses and Lectures. Vol. 499. Wien: Springer.
- Rytter, A., 1993, "Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures", Ph. D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark.
- Sinou, J. J., 2009, "A review of damage detection and health monitoring of mechanical systems from changes in the measurement of linear and non-linear vibrations". Mechanical Vibrations: Measurement, Effects and Control, Nova Science Publishers, 643-702.
- Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W., Nadler, B. R., Czarnecki, J. J., 2004, "A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001". Los Alamos National Laboratory, LA-13976-MS, Los Alamos, NM.
- Cha, Y.; Buyukozturk, O., 2015, "Structural Damage Detection Using Modal Strain Energy and Hybrid Multiobjective Optimization". Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. Vol. 30, Iss. 5, pp 347-358.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DAMAGE DETECTION IN LAMINATED COMPOSITE MATERIAL CONSIDERING MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION AND GENETIC ALGORITHMS

Guilherme Ferreira Gomes, guilhermefergom@unifei.edu.br¹

Sebastião Simões Cunha Jr, sebas@unifei.edu.br¹

Antônio Carlos Ancelotti Jr, ancelotti@unifei.edu.br¹

¹Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, Itajubá-MG, Brasil

Abstract. Structures with hard maintenance and access need to have as an ally a monitoring process of structural integrity. The structural health monitoring by means of damage detection studies is present in many engineering applications because they enable that corrective actions be applied to ensure the structural integrity of a given machine or equipment. In this work, we developed a study, using numerical simulations in order to assess damage detection techniques applied to composite materials, because the application of these materials in components and structures have replaced metallic materials due to its low weight and high strength. This research will be based on solving the direct and inverse problem by combining data from a model and the experimental case in order to detect structural damage. It carried out the mechanical modeling of the forward problem by finite element method and heuristic optimization techniques in order to minimize a particular objective function written in function of dynamic parameters. The structure studied is constituted of a laminate of carbon fiber, and three damage models were used: (a) a single circular hole and (b) multiple damage modeled as circular holes. The results of optimization algorithms employed in conjunction with the finite element model showed good efficacy in the detection of structural damage.

Keywords: Damage Detection, Genetic Algorithm, Pareto Front, Vibrations, Composite Materials