

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE SOBRE O COMPORTAMENTO DINÂMICO DE MATERIAIS COMPÓSITOS LAMINADOS

⁽¹⁾ Cristhian Machado de Souza, ⁽²⁾ Túlio Henrique Leão, ⁽³⁾ Adriana Amaro Diacenco

⁽¹⁾ Aluno-pesquisador, bolsista FAPEMIG – Engenharia Mecânica, cristhian.crash@gmail.com

⁽²⁾ Aluno-pesquisador – Engenharia Mecânica, tuliohleao@gmail.com

⁽³⁾ Professora Doutora, adriana_aadiacenco@yahoo.com.br

RESUMO

A possibilidade de unir materiais distintos, de modo que se obtenha novos materiais com propriedades específicas exigidas para atender às necessidades de um projeto, torna cada vez mais importantes estudos voltados para materiais compósitos. Existem grandes vantagens na utilização deste tipo de material, o fator resistência/peso por exemplo acaba se tornando um grande destaque, já que apresenta resultados muito melhores se comparados com materiais convencionais como aço e alumínio. Com a grande crescente utilização de compósitos estruturais do tipo laminado este trabalho busca criar pelo método de elementos finitos um programa capaz de realizar análises modais, possibilitando um estudo de danos em um material compósito laminado, conseqüentemente possibilitando análise da viabilidade da utilização de um determinado material em um projeto específico. Qualquer estrutura possui parâmetros como frequência natural e modos de vibrações particulares, assim as análises modais são utilizadas para verificar qualquer desvio desses parâmetros iniciais, se existirem mudanças, caracteriza-se um material com presença de danos em sua estrutura.

Palavras-chave: Compósitos laminados; Análises modais; Elementos Finitos.

INTRODUÇÃO

Materiais compósitos têm sido utilizados cada vez mais em substituição aos materiais convencionais por apresentarem propriedades superiores e/ou específicas, dentre as quais, pode citar a sua relação resistência/peso muito superior quando comparado aos materiais metálicos tradicionais como aço e alumínio (CALLISTER Jr., 2012; DIACENCO, 2010).

A integração de materiais compósitos, em especial em áreas que utilizam grande tecnologia, como na indústria aeroespacial, passa por uma constante crescente, assim surgem cada vez mais técnicas voltadas para a modelagem dos mesmos, permitindo prever o comportamento desses materiais sem que seja necessário ensaios em escalas reais. (de LIMA et al., 2009).

De um modo geral, materiais e estruturas estão sujeitas a perturbações estáticas e dinâmicas que afetam o seu comportamento mecânico. Nesse sentido, a utilização de um

modelo que represente o comportamento mecânico de determinado material e, como este comportamento é alterado quando certos parâmetros e/ou propriedades dos materiais são alteradas devido a estas perturbações se mostra indispensável.

Quando há uma variação da rigidez da estrutura ou material, esta variação muitas vezes está condicionada a uma alteração no módulo de elasticidade do material, logo com esta pesquisa pretende-se investigar como a alteração no módulo de elasticidade influencia o comportamento mecânico, no contexto da análise dinâmica.

De acordo com o que foi exposto acima torna-se extremamente significativo o entendimento e análise do comportamento dinâmico de materiais compósitos estruturais do tipo laminado via método de elementos finitos. De acordo com o que foi exposto acima torna-se extremamente significativo o entendimento e análise do comportamento dinâmico de materiais compósitos estruturais do tipo laminado via método de elementos finitos.

MATERIAL E MÉTODOS

Até o presente momento, foram desenvolvidas as revisões bibliográficas e estudos necessários para um melhor conhecimento sobre materiais compósitos em geral, dando assim um embasamento teórico suficiente para prosseguir para as próximas etapas deste trabalho.

MATERIAIS COMPÓSITOS

Um material compósito pode ser considerado um material constituído por dois ou mais materiais (fases) com propriedades distintas que quando unidas alcançam propriedades específicas, sendo assim, é um material multifásico que exhibe características de ambas as fases constituintes, de forma que o material final resultante dessa união apresente a melhor combinação das propriedades de suas fases (CALLISTER Jr., 2012).

A possibilidade de unir materiais distintos, de modo que, se obtenha novos materiais com propriedades específicas exigidas para atender às necessidades de um projeto, torna cada vez mais importantes estudos voltados para materiais compósitos.

Existem grandes vantagens na utilização deste tipo de material, é possível por exemplo, alcançar propriedades muito superiores em relação a materiais tradicionais, já que existe a possibilidade de projetar um compósito específico para uma utilidade determinada. Com a crescente utilização de compósitos estruturais do tipo laminado nas áreas de alta tecnologia e a falta de material bibliográfico em relação a danos presentes em compósitos, este trabalho busca criar pelo método de elementos finitos um programa capaz de realizar análises modais, possibilitando um estudo de danos em um material compósito

laminado, conseqüentemente possibilitando a viabilidade da utilização de um determinado material em um projeto específico.

Os compósitos laminados são constituídos por várias camadas (lâminas), frequentemente idênticas, variando suas orientações para melhor atender os requisitos de projeto ou fabricação, e também fazem com que o comportamento deste material possua características diferentes das observadas em cada lâmina individual (DIACENCO, 2010).

Qualquer estrutura possui parâmetros como frequência natural e modos de vibrações particulares, assim as análises modais são utilizadas para verificar qualquer desvio desses parâmetros iniciais, se existirem mudanças, caracteriza-se um material com presença de danos em sua estrutura.

Quando surge a necessidade de resolver um problema de análise de uma estrutura, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas. O modo como o MEF (método de elementos finitos) é formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. Referem-se em seguida alguns aspectos que é necessário ter em consideração na fase que antecede a análise de uma estrutura. As ações sobre as estruturas são em geral dinâmicas, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos seus componentes fica sujeito. Por este motivo, seria de esperar que a análise de uma estrutura teria obrigatoriamente de ter em consideração os efeitos dinâmicos. Contudo, em muitas situações é razoável considerar

que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezáveis as forças de inércia. Nestes casos a análise designa-se estática. (AZEVEDO, 2003).

Para a identificação de danos temos também a análise modal onde a mesma é o estudo de propriedades dinâmicas de estruturas lineares, baseadas em testes estruturais ou simulação baseada em análise de elementos finitos. A análise modal executada através de teste estrutura ou simulação baseada em análise de elementos finitos, ajuda você a entender como uma estrutura vibra, correlacionar e atualizar modelos de simulação, acelerar cálculos estruturas vibro-acústicos e de durabilidade, incluir flexibilidade em modelos de simulação de múltiplos corpos. (SIEMENS Automation).

TEORIA FSDT ASSOCIADA AO MEF

Para a modelagem da placa utilizou-se a Teoria da Deformação Cisalhante de Primeira Ordem (FSDT) combinada com o Método dos Elementos Finitos. Os campos de deslocamentos da FSDT, proposto por REDDY (1997), é expresso conforme a equação (A):

$$\begin{aligned} u(x,y,z,t) &= u_0(x,y,t) + z\psi_x(x,y,t) \\ v(x,y,z,t) &= v_0(x,y,t) + z\psi_y(x,y,t) \\ w(x,y,z,t) &= w_0(x,y,t) \end{aligned} \quad (1)$$

sendo ψ_x e ψ_y as rotações dos segmentos normais à superfície de referência em torno dos eixos y e x respectivamente.

OBTENÇÃO DAS MATRIZES DE MASSA E RIGIDEZ

As matrizes de massa e rigidez elementares segundo a Teoria de Elementos Finitos para um elemento de placa são dadas conforme a equação (2).

$$M^{(e)} = \sum_{k=1}^n \int_{z=z_k}^{z_{k+1}} \int_{\xi=-1}^{\xi=+1} \int_{\eta=-1}^{\eta=+1} \rho_k N^T(\xi, \eta) A^T(z) A(z) N(\xi, \eta) \det(J) d\eta d\xi dz \quad (2)$$

Sendo que ρ é a densidade, $N^T(\xi, \eta)$ é a matriz transposta das funções de forma do elemento *Serendipity*, A^T é a matriz transposta da matriz A , expressa na equação (Cb), $N(\xi, \eta)$ é a matriz das funções de forma e J é o jacobiano.

A matriz de rigidez foi separada em dois efeitos: flexão-membrana e cisalhamento, conforme as equações (L) e (M), respectivamente.

$$K_b^{(e)} = \sum_{k=1}^n \int_{z=z_k}^{z_{k+1}} \int_{\xi=-1}^{\xi=+1} \int_{\eta=-1}^{\eta=+1} B_b^T(\xi, \eta, z) C_b^k B_b(\xi, \eta, z) \det(J) d\eta d\xi dz \quad (3)$$

$$K_s^{(e)} = \sum_{k=1}^n \int_{z=z_k}^{z_{k+1}} \int_{\xi=-1}^{\xi=+1} \int_{\eta=-1}^{\eta=+1} B_s^T(\xi, \eta, z) C_s^k B_s(\xi, \eta, z) \det(J) d\eta d\xi dz \quad (4)$$

Sendo que B_b^T e B_s^T são as matrizes transpostas dos operadores das equações (Ga) e (Gb), respectivamente, aplicados as funções de forma do elemento *Serendipity* em coordenadas locais, B_b e B_s são as matrizes dos operadores em coordenadas locais. As matrizes elementares são calculadas para cada elemento da malha de elementos finitos e as equações globais do movimento são construídas levando-se em conta a conectividade dos nós, usando procedimentos padrões de montagem por elementos finitos (Diacenco (2010)). Após a montagem, a equação global do movimento no domínio do tempo é escrita conforme a Equação

$$M\ddot{q}(t) + Kq(t) = f(t) \quad (5)$$

Sendo $M = \bigcup_{e=1}^{nelem} M^{(e)}$ e $K = \bigcup_{e=1}^{nelem} K^{(e)}$ as matrizes de rigidez global e de massa. O símbolo \bigcup indica a matriz de montagem, $q(t)$ é o vetor de deslocamento global e $f(t)$ é o vetor de cargas generalizadas.

A ordem das matrizes de massa e rigidez depende do número de graus de liberdade adotados no sistema. Assim, para um sistema de N graus de liberdade, as matrizes terão ordem $N \times N$ e os vetores ordem $N \times 1$.

A equação (5) pode ser expressa no domínio da frequência, considerando a condição de vibração livre. Considerando $f(t) = 0$ tem-se a solução harmônica para a Equação (6).

$$\{q(t)\} = \{Q\} e^{i\omega t} \quad (6)$$

Derivando, duas vezes, a Equação (O) em função do tempo é possível obter a Equação (6).

$$\{\ddot{q}(t)\} = -\omega^2 \{Q\} e^{i\omega t} \quad (7)$$

Substituindo as Equações (6) e (7) na Equação (5), tem-se a Equação (8).

$$(K - \omega^2)\{Q\} = 0 \quad (8)$$

onde:

ω^2 são os autovalores que representam o quadrado das frequências naturais;

$\{Q\}$ são os autovetores que representam os correspondentes deslocamentos dos seus respectivos modos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta primeira aplicação serão consideradas cinco camadas laminadas orientadas à $(0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)$ e a $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ)$ com a mesma espessura. A tabela 1 mostra os quatro primeiros modos de vibração da estrutura laminada.

Tabela 1. Frequências naturais para os três primeiros modos de vibração à $(0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)$

Modo	Frequências Naturais de Vibração em Hz
1	294.09
2	430.49
3	1273.7

Tabela 2. Frequências naturais para os três primeiros modos de vibração à $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ)$

Modo	Frequências Naturais de Vibração em Hz
1	98.697
2	140.94
3	342.11

Os resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2 demonstram claramente a influência da orientação das fibras no comportamento dinâmico, visto que a variação da simetria das camadas altera de maneira significativa as frequências de vibração.

CONCLUSÕES

A modelagem proposta mostra que é possível prever o comportamento do material compósito laminado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais- FAPEMIG pela Bolsa de Iniciação Científica concedida ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

Azevedo, A. F. M. Método dos Elementos Finitos: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 1ª Edição, Abril 2003.

CALLISTER, Jr., W.D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução. Editora LTC, 8 Ed., Rio de Janeiro, RJ, 2012. ISBN: 85216-1288-5.

de LIMA, A.M.G.; DIACENCO, A. A.; CÔRREA, E. O. . Finite Element Modeling of Composite Sandwich Plates with Viscoelastic Layers. In: 20th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM), 2009, Gramado, RS.

DIACENCO, A.A. Modelagem por elementos finitos de materiais compósitos incorporando material viscoelástico para o controle passivo de vibrações e ruído. Dissertação (Mestrado em Engenharia Materiais para Engenharia) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Itajubá, 2010.

Faria, A.W. Modelagem por Elementos Finitos de Placas Compostas dotadas de Sensores e Atuadores Piezoelétricos: implementação computacional e avaliação numérica. 2006. 152f. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

Pinheiro, M. A. S. ;Beckhauser, G. N. ; Menezes, M. R. . Aplicativo Voltado para a Macromecânica Básica das Estruturas Laminadas de Material Compósito. Boletim SBMAC (Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, v. VII, p. 209-222, 2006.



REDDY JN. Mechanics of laminated composite plates: theory and analysis. 2nd ed. CRC Press; 1997.

SIEMENS Automation
https://www.plm.automation.siemens.com/pt_br/plm/modal-analysis.shtml; Acesso 16/08/2016.