

DINÂMICA DE VIGA EM COMPÓSITO COM CAMADA ATIVA DE ELEMENTOS PIEZELÉTRICOS

Flávio Donizeti Marques, fmarques@sc.usp.br¹

Wesley Barbosa Rodrigues Filho, wesley.aero@gmail.com¹

Volnei Tita, voltita@sc.usp.br¹

Mariano Eduardo Moreno, mmoreno@ufscar.br²

¹University of São Paulo, School of Engineering of São Carlos, Aeronautical Engineering
Av. Trabalhador São-Carlense, 400, 13566-590, São Carlos, SP, Brazil.

²Federal University of São Carlos, Center of Exact Science and Technology
Rod. Washington Luiz, km 235, 13565-905, São Carlos, SP, Brazil.

Resumo: *O projeto e síntese de sistemas de controle para a resposta ativa aeroelástica, particularmente para reduzir ou eliminar os efeitos danosos da instabilidade flutter, ainda é um desafio considerável. A incorporação de sistemas de controle ativo possibilitou a exploração de novos conceitos de projeto de aeronaves. Contudo, enquanto os problemas aeroelásticos poderiam ser eliminados, teoricamente, com o uso de técnicas de sistemas de controle, sua implementação prática envolve frequentemente aumento no peso da aeronave. Presentemente, este problema tem sido contornado pelo uso de materiais ativos ou inteligentes. Mais recentemente, as fibras ativas em compósitos, feitas de fibras/tiras de materiais piezelétricos incorporados em laminados de compósitos, representam um grande avanço tecnológico para a fabricação de estruturas aeroespaciais inteligentes. O objetivo desse trabalho é estudar vigas de compósito com camadas de tiras piezelétricas visando aplicações como sensores modais e atuadores em problemas de controle aeroelástico. Modelagem matemática e subsequente validação experimental são consideradas. Inicialmente, um modelo em elementos finitos para o comportamento eletro-mecânico de um compósito ativo é desenvolvido. Testes modais para uma viga em compósito são realizados para validar o modelo em elementos finitos. Tal abordagem visa ajudar no desenvolvimento de um modelo em elementos finitos apropriado para compósitos ativos aplicados em problemas de controle ativo da resposta aeroelástica.*

Palavras-chave: *controle aeroelástico, compósitos com fibras ativas, elementos finitos multifísicos, vigas de compósitos ativos, análise modal, materiais piezelétricos.*

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais, a indústria aeronáutica moderna tem procurado superar o desempenho de seus produtos. É compreensível entender que as aeronaves para serem mais eficientes devem ser leves e resistentes estruturalmente. Tal compromisso, no entanto, não é tão fácil de conseguir o que implica na ocorrência de respostas estruturais indesejadas. Das respostas estruturais indesejadas em aeronaves, as mais importantes são originadas por efeitos aeroelásticos. Metodologias para o controle de supressão de respostas aeroelásticas indesejadas de estruturas tornaram-se um campo promissor de pesquisas. Recentemente, a adoção de novos materiais em controle da dinâmica estrutural tem ganhado maior importância, especialmente na engenharia aeronáutica. Os principais materiais ativos aplicados em controle estrutural são: cerâmicas e polímeros piezelétricos: Jaffe *et al.* (1971), Rogers (1990), Crawley (1994), Simpson *et al.* (1998) e Vinogradov & Holloway (1999); Fibras ópticas: Troy (1997), Measures *et al.* (1998) e Brown *et al.* (1999); Ligas de memória de forma: Rogers (1990) e Simpson *et al.* (1998); Materiais eletro-magneto-strictivos: Rogers (1990) e Simpson *et al.* (1998); Fluidos de reologia variável (eletro-magneto-reológicos, ER/MR): Simpson *et al.* (1998) e Yalcintas & Dai (1999). Muitos desses novos materiais, em particular os piezelétricos, apresentam propriedades específicas que tornam apropriada a sua aplicação como atuadores e sensores incorporados em componentes estruturais. A inclusão de tais elementos atuadores e sensores possibilitaram a categorização de uma nova classe de sistemas estruturais chamados de *estruturas inteligentes* (Crawley, 1994).

Mais recentemente, as fibras ativas em compósitos (do inglês, *active fiber composites* – AFCs) (Muller, 2006), feitas de fibras de materiais piezelétricos incorporadas em estruturas aeronáuticas de materiais compósitos representam um grande avanço tecnológico para a fabricação de estruturas aeronáuticas inteligentes. A aplicação de materiais compósitos é uma realidade atual principalmente no segmento de indústrias aeronáutica e aeroespacial. A utilização de AFCs em aerosevoelasticidade tem crescido quando se busca projetar uma estrutura aeronáutica em material compósito. Isto tem proporcionado a criação do conceito de asas inteligentes comandadas por sistemas de controle ativos adequadamente projetados para reduzir efeitos de instabilidade aeroelásticas, corrigir respostas aeroelásticas dinâmicas e também podendo ser usado como alternativa para eliminar o uso de superfícies de comando móveis

(articuladas). Esse conceito poderá proporcionar estruturas aeronáuticas mais eficientes e seguras do ponto de vista de instabilidades. O trabalho pioneiro de desenvolvimento e aplicação de AFCs é atribuído a Bent & Hagood (1997), que fabricaram AFCs cilíndricas extrudadas individualmente e embebidas em uma camada de resina epóxi entre duas camadas de eletrodos. Os eletrodos são utilizados para polarizar e para orientar o campo elétrico longitudinalmente às fibras piezelétricas polarizadas. Wilkie *et al.* (2000) apresentam uma alternativa de custo menos elevado para a fabricação de fibras piezelétricas. Bent & Hagood (1997) obtiveram fibras cilíndricas (AFCs) extrudadas individualmente, enquanto que Wilkie *et al.* (2000) obtiveram fibras piezelétricas (chamadas MFC) através do corte direto a partir de placas piezelétricas. Os dois tipos de fibras são similares quanto ao princípio de operação e desempenho, somente diferenciados os custos devido à fabricação e a forma das seções transversais, ou seja, cilíndrica para AFC e retangular para MFC.

Este trabalho apresenta um estudo sobre a dinâmica de vigas com tiras de material piezelétrico colados, visando estabelecer o comportamento de estruturas ativas no contexto de compósitos ativos do tipo AFC. Modelagem matemática e validação experimental são consideradas e realizadas. Um modelo em elementos finitos da viga com piezelétricos colados é desenvolvido. Subsequentemente, um estudo do comportamento modal é realizado. Experimentos com viga de compósito como substrato é realizado para validação do modelo em elementos finitos.

2. TRANSDUTOR PIEZELÉTRICO BIMÓRFICO

Piezeletricidade é a capacidade de desenvolver uma carga elétrica quando sujeito a uma deformação mecânica e vice-versa (Jaffe *et al.*, 1971). O comportamento de um material piezelétrico é composto pelo acoplamento dos efeitos da elasticidade linear (mecânico) com os efeitos da polarização de um material (elétrico). As equações constitutivas que caracterizam um material piezelétrico são:

$$\begin{cases} \{S\} = [s]\{\sigma\} + [d]\{E\} \\ \{D\} = [d]^T\{\sigma\} + [\varepsilon]\{E\} \end{cases}, \quad (1)$$

onde $\{S\}$ é o vetor deformação mecânica, $\{D\}$ é o vetor densidade de fluxo elétrico, $\{\sigma\}$ é o vetor tensão mecânica, $\{E\}$ é o vetor campo elétrico, $[s]$ é a matriz de flexibilidade, $[d]$ é a matriz piezelétrica de deformação e $[\varepsilon]$ é a matriz de permissividade dielétrica do material.

A matriz de flexibilidade pode ser escrita conforme,

$$[s] = [c]^{-1}, \quad (3)$$

onde $[c]$ é a matriz de elasticidade (rigidez estrutural).

O elemento piezelétrico utilizado apresenta 31,8 mm de comprimento, 3,2 mm de largura e 0,38 mm de espessura, e densidade de 7800 kg/m³. Seu material piezocerâmico é o PSI-5H4E, cujas principais vantagens são as altas relações deslocamento/V e carga elétrica/N, o que é muito útil quando se tem voltagem ou força limitada. Além disso, esse piezelétrico possui uma camada reforçadora de latão entre as duas camadas de cerâmica, que geralmente tem pouco efeito em seu desempenho. O material do piezelétrico possui isotropia transversal, que é um caso especial de ortotropia. Um material transversalmente isotrópico tem propriedades semelhantes em um plano, e diferentes propriedades na direção normal a ele. Dessa forma, ao invés das nove constantes elásticas independentes que definem este caso, são necessárias apenas cinco dessas para aquele. Por convenção, os eixos do sistema cartesiano são orientados da seguinte forma: x na direção do comprimento, y na direção da largura e z na direção da espessura do elemento piezelétrico. Nesse caso, em que as propriedades são iguais no plano x - y , o índice p representa essas duas direções. Assim, as cinco constantes elásticas são o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson no plano de simetria x - y , E_p e ν_p , o módulo de elasticidade, o módulo de cisalhamento e o coeficiente de Poisson na direção z , E_z , G_{zp} e ν_{zp} respectivamente. Com isto, a equação constitutiva em termos da matriz de flexibilidade pode ser escrita como:

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{cases} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_p} & -\frac{\nu_p}{E_p} & -\frac{\nu_{zp}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_p}{E_p} & \frac{1}{E_p} & -\frac{\nu_{zp}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{zp}}{E_p} & -\frac{\nu_{zp}}{E_p} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu_p}{E_p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{zp}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{zp}} \end{bmatrix} \begin{cases} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{cases}, \quad (4)$$

com

$$\frac{\nu_{pz}}{E_p} = \frac{\nu_{zp}}{E_z} \quad (5)$$

Se a direção de polarização do piezelétrico é alinhada com o eixo z , as matrizes piezelétricas, $[d]$ e $[\varepsilon]$, também podem ser simplificadas, podendo ser escritas como:

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{zx} \\ 0 & 0 & d_{zy} \\ 0 & 0 & d_{zz} \\ 0 & d_{y,xy} & 0 \\ d_{x,yz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

com

$$d_{zx} = d_{zy} \quad (7)$$

e

$$d_{y,xy} = d_{x,yz}, \quad (8)$$

e

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix}, \quad (9)$$

com

$$K_x = K_y \quad (10)$$

e

$$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ [F/m]} \quad (11)$$

onde $K_{(x,y,z)}$ são as constantes dielétricas relativas e ε_0 é a constante de permissividade do vácuo.

As propriedades fornecidas pelo fabricante (Anônimo, 2008) são insuficientes para definir as três matrizes características do piezelétrico (Eqs. (4), (6) e (9)). A fim de suprir essa falta de informações, buscaram-se valores de referência do material PSI-5H4E, sendo essas informações encontradas na Tab. 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas e piezelétricas fornecidas pelo fabricante.

FABRICANTE		REFERÊNCIA	
E_p (MPa)	62000	ν_p	0.29
E_z (MPa)	50000	ν_{zp}	0.40
d_{zx} (m/V)	-320×10^{-12}	G_{pz} (MPa)	11494
d_{zz} (m/V)	650×10^{-12}	$d_{x,yz}$ (m/V)	741×10^{-12}
K_z	3800	K_x	3130

O Ansys[®] permite entrar com as propriedades do piezelétrico em termos das Eqs. (4), (6) e (9). Sendo assim, com todas as variáveis definidas, essas matrizes assumem a forma seguinte:

$$s = \begin{bmatrix} 16.129 & -4.677 & -8.0 & 0 & 0 & 0 \\ -4.677 & 16.129 & -8.0 & 0 & 0 & 0 \\ -8.0 & -8.0 & 20.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 43.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 43.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20.8 \end{bmatrix} \times 10^{-12}, \quad (12)$$

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -320 \\ 0 & 0 & -320 \\ 0 & 0 & 650 \\ 0 & 741 & 0 \\ 741 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-12}, \quad (13)$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} 3130 & 0 & 0 \\ 0 & 3130 & 0 \\ 0 & 0 & 3800 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Para a modelagem dos piezelétricos utilizou-se um elemento 3D com capacidade para análise piezelétrica. Dentre os vários elementos do pacote oferecido pelo Ansys[®], escolheu-se o SOLID5 uma vez que este atende aos requisitos necessários para o tipo de solução desejada.

Segundo Anônimo (2008), aplicando-se uma voltagem de 80 V a um piezelétrico de modelo semelhante ao utilizado na pesquisa, no entanto com comprimento de referência igual a uma polegada e engastado em uma de suas extremidades, este se desloca, devendo formar uma flecha de 300 micrometros em sua extremidade livre.

Essa simulação foi então realizada pelo método dos elementos finitos, por meio do software Ansys[®], a fim de validar o modelo computacional do piezelétrico. O valor obtido computacionalmente foi de 314 μm , enquanto que, segundo o fabricante, o deslocamento deveria ser de 300 μm , resultando em um erro de 4,7%. Esse erro é considerado aceitável, uma vez que não se tem as propriedades precisas do piezelétrico. Portanto, o modelo computacional do piezelétrico é considerado válido, e as propriedades de referência adotadas para suprir a falta de informações sobre o material, são atribuídas aos demais modelos estudados nas etapas seguintes deste trabalho.

3. VIGA EM COMPÓSITO

3.1. Modelo Computacional

O modelo computacional admite uma viga em balanço de 280 mm de comprimento, 38.4 mm de largura, 2.35 mm de espessura e densidade de 1170 kg/m³. O programa de elementos finitos utilizado no desenvolvimento do modelo computacional foi o Ansys[®]. Preferiu-se trabalhar com elementos 2D, por se tratar de uma viga fina e esbelta. Além disso, uma vez que a viga é de material compósito, fez-se uso do elemento SHELL181, presente no conjunto de elementos disponíveis no software, pois este permite distribuir o material em camadas ao longo da espessura. Através de uma análise modal feita pelo Ansys[®], com os dois modelos computacionais criados, um com orientação 0°/90° e o outro com 45°/-45°, encontraram-se os 5 primeiros modos da estrutura.

3.2. Desenvolvimento de Corpos de Prova e Ensaios Modais

Foram realizados ensaios de vigas de seção retangular fabricadas em material compósito, ainda sem a incorporação dos elementos piezelétricos. Esse procedimento permitiu iniciar os estudos na geração de modelos computacionais para vigas em compósitos, bem como serviu de base para a análise dinâmica de diversos modelos com piezelétricos adicionados à sua estrutura. Também, foi possível avaliar possíveis problemas e dificuldades na modelagem e nos ensaios de materiais compósitos, devido às características próprias desse tipo de material.

A fabricação das vigas foi realizada em parceria com a oficina de reparos de estruturas em compósitos, no Centro Tecnológico da TAM, localizado na cidade de São Carlos, SP. O processo utilizado na fabricação foi o de laminação manual da estrutura. Foram confeccionadas duas vigas com resina epóxi e tecido de fibra de carbono, sendo este formado por uma malha de fibras orientadas em duas direções principais, perpendiculares entre si. Cada uma das vigas possui quatro camadas de tecido, sendo que uma delas possui orientação 0°/90°, enquanto que a outra é 45°/-45°.

A fim de se obter as propriedades mecânicas do laminado constituinte das vigas, foram realizados ensaios estáticos em corpos de prova fabricados seguindo os mesmos procedimentos e com o mesmo material de fabricação das vigas. Um compósito com tecido de fibras contínuas é um material ortotrópico, necessitando então de nove constantes de material independentes. No entanto, o elemento SHELL181 permite que se trabalhe apenas com as propriedades no plano x-y, ficando por conta do Ansys[®] o cálculo do comportamento na direção z, uma vez que esse elemento apresenta características de flexão. Sendo assim, o número de constantes independentes passa de nove para quatro. Nessas condições, as relações entre deformação e tensão podem ser escritas como:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & 0 \\ -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

com

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y} \quad (16)$$

Sendo assim, as propriedades para definir o material são: módulos de elasticidade nas direções x e y (E_x e E_y , respectivamente), módulo de cisalhamento (G_{xy}) e coeficiente de Poisson (ν_{xy}) no plano x-y e densidade (ρ) (ver Tab. 2).

Tabela 2. Propriedades mecânicas dos corpos de prova.

E_x (MPa)	44818
E_y (MPa)	44818
G_{xy} (MPa)	2397
ν_{xy}	0.1059

Para a aquisição dos dados modais utilizados para a validação dos modelos em elementos finitos foram utilizados os seguintes equipamentos: microcomputador, analisador espectral LDS-Photon II e martelo de impacto PCB, acelerômetro PCB e outros equipamentos de apoio. Utilizando parâmetros de amostragem conforme Tab. 3, foi possível obter as FRFs das vigas, em termos da relação entre aceleração e força. Dessa forma, foram obtidas as frequências naturais de vibração do corpo, caracterizadas por uma resposta muito alta frente a uma pequena excitação e associadas a um modo de vibrar.

Tabela 3. Parâmetros de amostragem para obtenção das FRFs.

Linhas Espectrais	Faixa de Frequência (Hz)	Janelamento
1600	0-550	Força/Exponencial

A principal vantagem da excitação via martelo de impacto é a rapidez e a facilidade em preparar os ensaios. Entretanto, esse procedimento apresenta controle limitado sobre a força aplicada, resolução de frequência limitada e problemas com repetibilidade. Apesar disso, dentro de certos limites os resultados são satisfatórios, viabilizando sua aplicação. Dependendo da posição do acelerômetro, alguns modos de vibrar podem não ser percebidos, levando a resultados incompletos. Para evitar tal problema, o acelerômetro foi disposto em oito pontos, distribuídos como mostra a Fig. 1. A força foi aplicada em uma região mais próxima à raiz da viga a fim de permitir forças de magnitudes maiores sem que houvesse sobrecarga nos sensores. Uma vez definidos todos os parâmetros a serem seguidos no experimento, realizaram-se três aquisições de dados por ponto, seguidas de uma sobreposição de resultados, a fim de se obter as curvas de resposta em frequência para ambas as vigas, conforme instalação mostrada na Fig. 2(a) e (b).

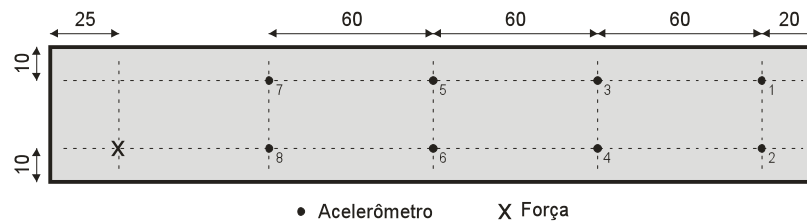


Figura 1. Pontos de fixação do acelerômetro e de aplicação da força (mm).

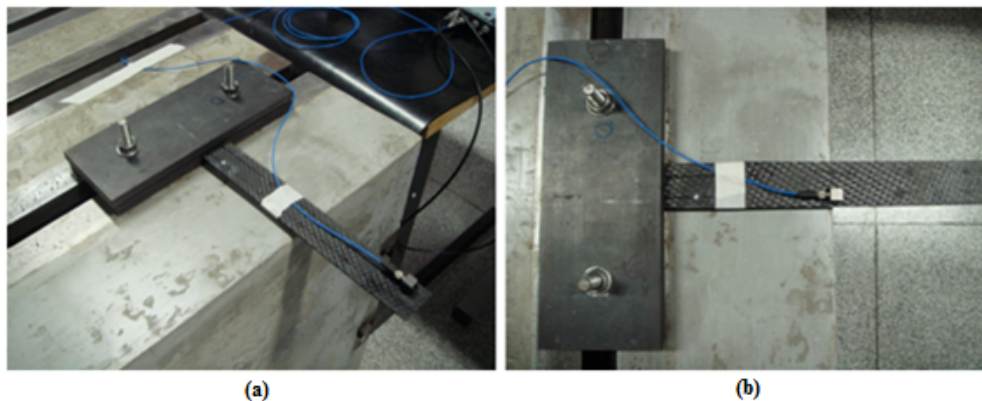


Figura 2. CDP pronto para ensaio experimental.

4. MODELO DE VIGA ATIVA

Os modelos de viga ativa são analisados pela influência do posicionamento e quantidade de elementos piezelétricos nos modos da estrutura. Basicamente, os modelos criados são uma combinação dos já apresentados para a viga e para o piezelétrico. No caso do modelo da viga, suas dimensões e densidade podem ser encontradas na seção 3.1, enquanto que as propriedades mecânicas são apresentadas na seção 3.2. Além disso, o modelo utilizado foi o de orientação $0^\circ/90^\circ$. Já para o modelo do piezelétrico, suas dimensões e suas propriedades mecânicas e piezelétricas encontram-se na seção 2. Dessa forma, os parâmetros de entrada no Ansys[®] são as matrizes (12) a (14).

Foram gerados seis modelos diferentes, sendo três deles com apenas um piezelétrico em sua estrutura e os demais com três. A Fig. 3(a) e (b) mostra um esquema de como esses elementos foram posicionados na viga em compósito, com três configurações diferentes para cada viga (a, b e c). Essas posições foram arbitrariamente definidas, sem se preocupar, por exemplo, com os nós dos modos de vibrar.

O modelo de elementos finitos para a viga é semelhante ao descrito na seção 3.1, inclusive a condição de engaste aplicada a ele. A novidade nos novos modelos está na utilização de um elemento 3D (SOLID5) para os piezelétricos. No modelo da viga foi criada uma superfície com as dimensões e com a malha desejada para o piezelétrico. A partir dessa superfície fez-se uma extrusão dos elementos em sua direção normal, gerando assim elementos de volume. Foi feita uma extrusão na direção positiva de z e outra na direção negativa desse mesmo eixo, com seis elementos distribuídos uniformemente ao longo de sua espessura total, de forma que o plano médio do piezelétrico coincidissem com o plano médio da viga. Dessa forma, os sólidos criados em uma direção representam uma das duas lâminas do piezelétrico bimórfico, enquanto que os criados na direção oposta representam a outra lâmina. Na modelagem do piezelétrico não se levou em conta a camada reforçadora de latão, presente entre as duas lâminas de elementos piezelétricos.

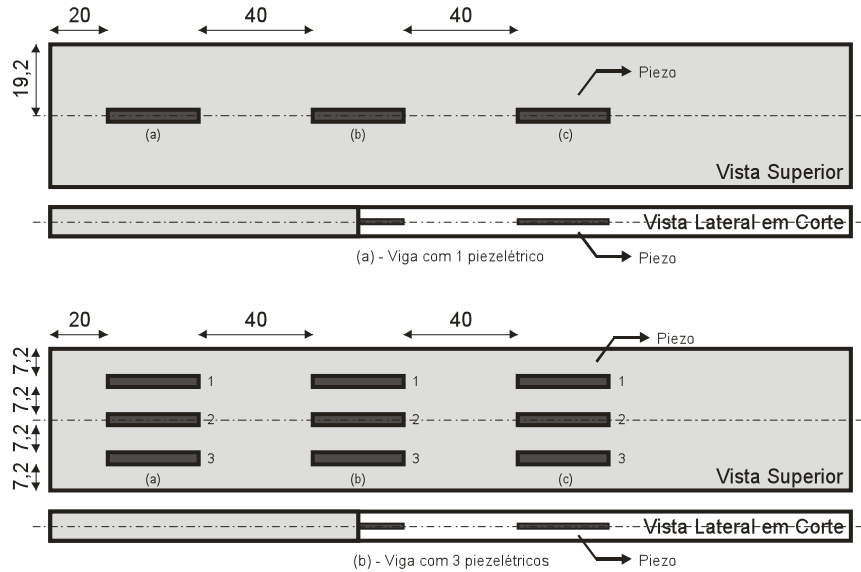


Figura 3. Distribuição dos piezelétricos na viga em compósito (dimensões em mm).

Após a criação dos elementos sólidos, aplicou-se o comando Merge do Ansys[®], o qual possui a função de unir os nós que ocupam a mesma posição no modelo. Dessa forma, garante-se que ambas as estruturas, viga e piezelétrico, compartilham os mesmos graus de liberdade nos nós selecionados. Com geometria e propriedades definidas, criou-se uma condição que possibilita o piezelétrico ser simulado como um sensor real. Essa condição é denominada equipotencialidade, e representa a criação de um eletrodo para aquisição do potencial elétrico nas superfícies superior e inferior do piezelétrico. Essa condição garante que o potencial medido nessas superfícies é sempre constante para cada superfície. Além disso, aplica-se uma voltagem de $0V$ nos nós da camada central do piezelétrico, simulando um aterramento, necessário para se medir a diferença de potencial elétrico.

Buscou-se analisar a sensibilidade dos elementos piezelétricos aos modos de vibrar da estrutura em função da posição em que se encontram na mesma. Para cada uma das configurações foi feita uma análise modal por meio do software Ansys[®], extraindo-se as cinco primeiras frequências naturais do modelo. A partir disso, foi obtido o potencial elétrico medido por cada piezelétrico em cada modo de vibrar da estrutura. Além disso, comparou-se a resposta em frequência dos piezelétricos, obtidas em V/N , em cada uma das posições propostas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o intuito de comparar os dados experimentais e computacionais, foram obtidas também as curvas de FRF dos modelos de elementos finitos, embora definida por uma relação entre deslocamento e força, enquanto que os ensaios experimentais fornecem uma relação entre aceleração e força. As frequências naturais e os modos de vibrar da Tab. (4) obtidos pela análise modal computacional da viga sem piezelétrico mostram a influência da orientação das fibras de carbono na dinâmica da estrutura. Nas Figs. 4(a) e (b) são apresentados os cinco primeiros modos naturais de vibração dos dois modelos em consideração. Observa-se principalmente uma maior rigidez flexional para a viga $0^\circ/90^\circ$, enquanto que a viga $45^\circ/-45^\circ$ apresenta maior rigidez torcional.

A Fig. 5 apresenta as FRFs experimental e computacional normalizadas, permitindo uma análise comparativa das frequências naturais da estrutura pelas duas abordagens. Observou-se que as curvas experimentais se mostraram deslocadas para a esquerda, com frequências naturais mais baixas do que as do modelo computacional. Uma explicação para essas curvas deslocadas para a esquerda é o efeito de amortecimento na estrutura real, o que não é considerado no

modelo. As vigas orientadas a $0^\circ/90^\circ$ apresentaram resultados que chegam a 30% de erro na frequência natural quando comparados com o resultado de elementos finitos. Além disso, as FRFs experimentais da Fig. 5 contêm picos além dos cinco previstos e em faixas de frequência para as quais não eram esperados. A região onde mais se encontra esse problema é a região de altas frequências, acima de 300 Hz.

Tabela 4. Análise modal computacional.

	$0^\circ/90^\circ$		$45^\circ/-45^\circ$	
	Frequência [Hz]	Modo de Vibrar	Frequência [Hz]	Modo de Vibrar
1º	29.993	1ª Flexão Transversal	15.506	1ª Flexão Transversal
2º	172.028	1ª Torção	98.199	2ª Flexão Transversal
3º	188.073	2ª Flexão Transversal	260.932	1ª Flexão no Plano
4º	477.702	1ª Flexão no Plano	287.712	3ª Flexão Transversal
5º	527.298	3ª Flexão Transversal	464.571	1ª Torção

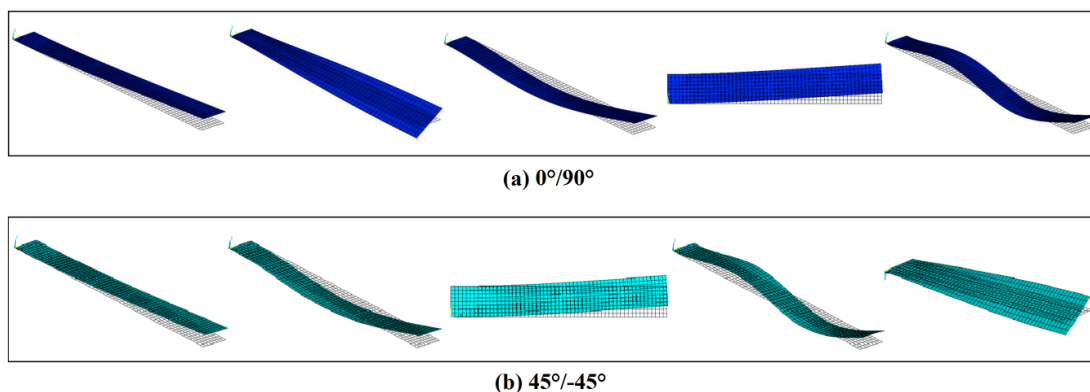


Figura 4. Cinco primeiros modos naturais de vibrar.

Já as vigas com orientação $45^\circ/-45^\circ$, mostraram melhor ajuste em termos de frequência natural entre os modelos computacional e experimental. Nos quatro primeiros modos os erros não chegam a 7%. Entretanto, para frequências mais elevadas, nem foi possível encontrar o quinto modo por meio dos ensaios experimentais. Levando em conta o amortecimento, esses erros se tornam ainda menores. Assim como para a outra viga, a qualidade dos resultados para altas frequências não foi boa. A curva experimental também apresentou irregularidades em regiões em que não eram previstas, mas de maneira geral os resultados podem ser considerados satisfatórios, confirmando também a boa qualidade do modelo computacional.

Principalmente nas vigas $0^\circ/90^\circ$, os resultados obtidos apresentaram grandes diferenças em relação às medidas computacionais. O principal motivo para isso pode estar em problemas na fabricação dos corpos de prova, já que a mesma não é automatizada, e sim manual. Durante a construção da estrutura em compósito, as lâminas de tecido pré-impregnado podem ter sido sobrepostas com ligeiras diferenças em suas orientações, e, além disso, algumas fibras podem ter sido danificadas, dobrando sobre si, com conseqüente perda de rigidez e falta de uniformidade da malha. Outro defeito advindo do método de fabricação é a grande quantidade de vazios presentes na estrutura, efeito que não ocorre no modelo computacional.

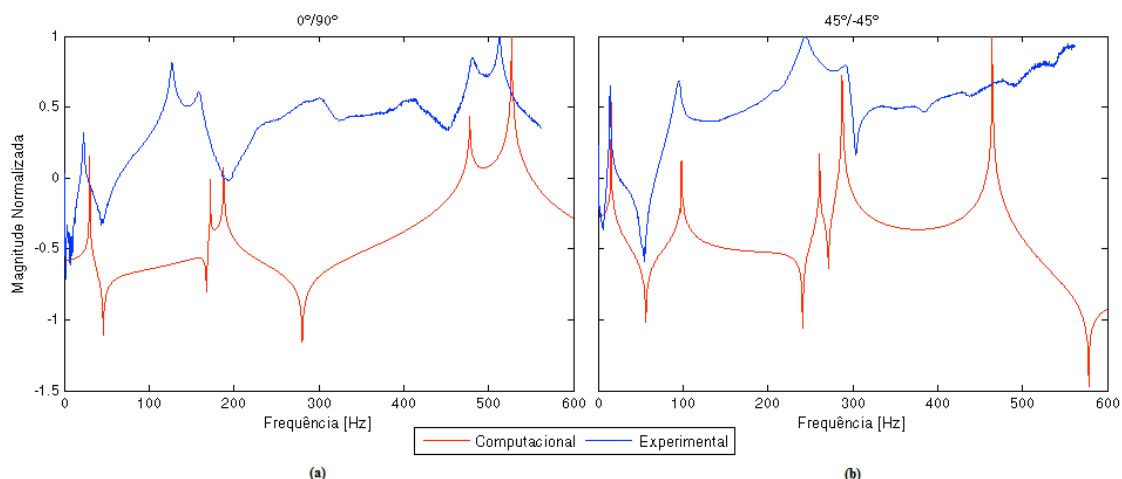


Figura 5. FRFs computacional e experimental das vigas $0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ/-45^\circ$.

Nas simulações da viga com apenas um piezelétrico foi possível perceber a baixa sensibilidade dessa configuração, mesmo para as três diferentes posições do elemento piezelétrico, conforme mostram as Figs. 6 e 7. Observa-se que a configuração com um piezelétrico não é sensível o suficiente para se detectar a presença do modo torcional e o de flexão no plano, uma vez que são localizados no eixo de simetria longitudinal da viga. Além disso, percebe-se pela Fig. 6(a), que mesmo para um modo de flexão, mais especificamente o terceiro modo de flexão transversal, tal configuração pode não ser muito sensível. Outro ponto de destaque é a alteração da ordem de aparição do segundo modo de flexão transversal e o primeiro modo torcional, mostrando que a presença de elementos piezelétricos na estrutura pode alterar a dinâmica da mesma.

Já na Fig. 8, percebe-se o quão mais sensíveis são as configurações com três elementos piezelétricos. Apesar de alguns modos serem apenas ligeiramente detectados, todos os cinco modos em questão foram percebidos pelo conjunto. Entretanto, na Fig. 9(b) percebe-se que o piezelétrico central do conjunto não é tão sensível ao modo torcional e ao modo de flexão no plano, sendo que em um dos casos esses modos nem são detectados por esse elemento. Isso ocorre devido à localização deste no eixo de simetria longitudinal da viga, recaindo nos casos apresentados na Fig. 6. De modo geral, as diferenças entre as FRFs não estão na variação entre os valores das frequências naturais, mas sim na magnitude medida por cada piezelétrico mostrando a sensibilidade de cada um deles como sensores.

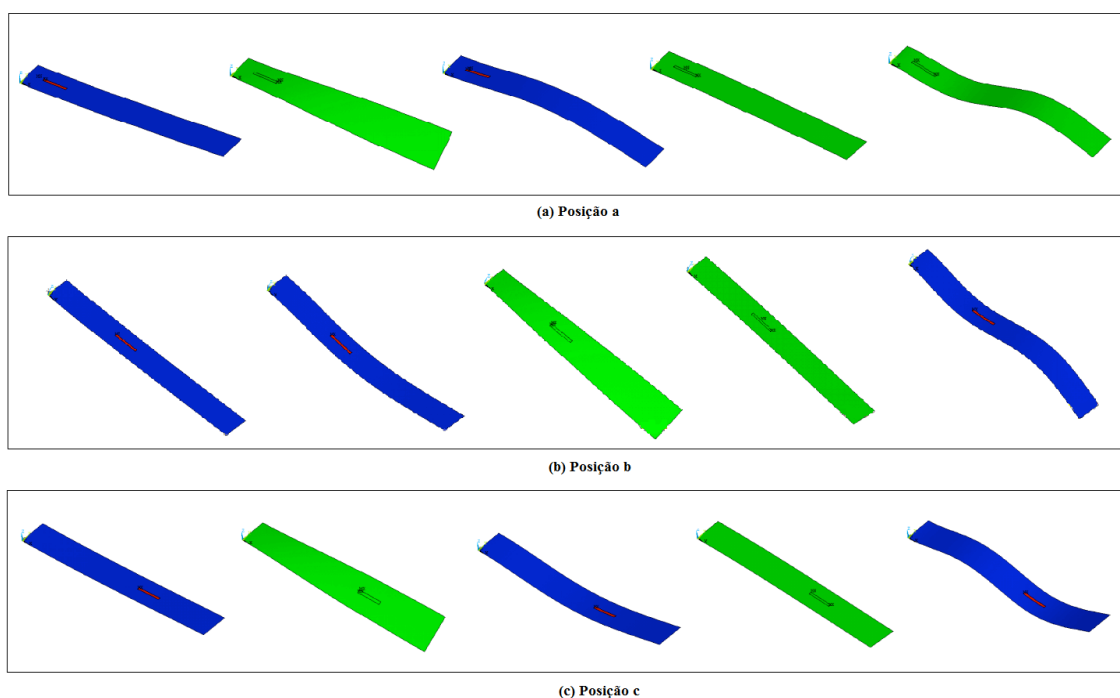


Figura 6. Formas modais (variáveis espaciais e de potencial elétrico) das vigas com 1 piezelétrico, nas três posições.

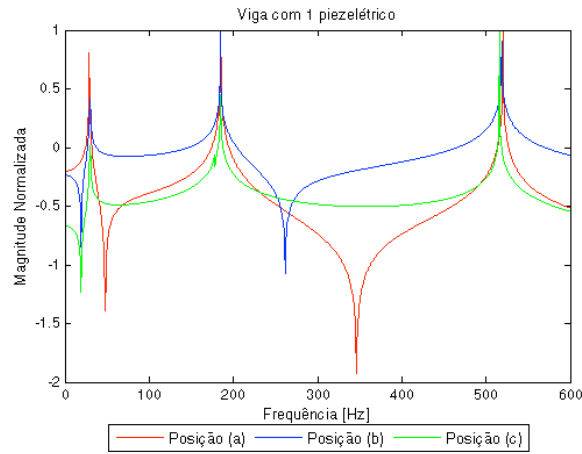


Figura 7. Comparação entre FRFs do piezolétrico nas três configurações.

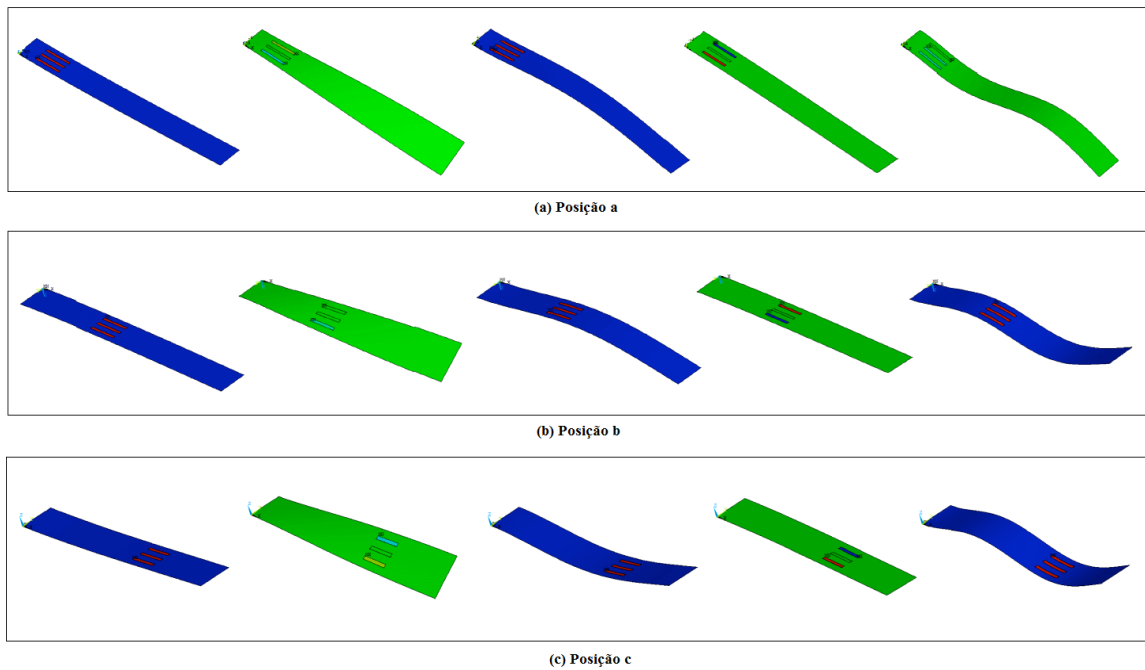


Figura 8. Formas modais (variáveis espaciais e de potencial elétrico) das vigas com 3 piezolétricos, nas três posições.

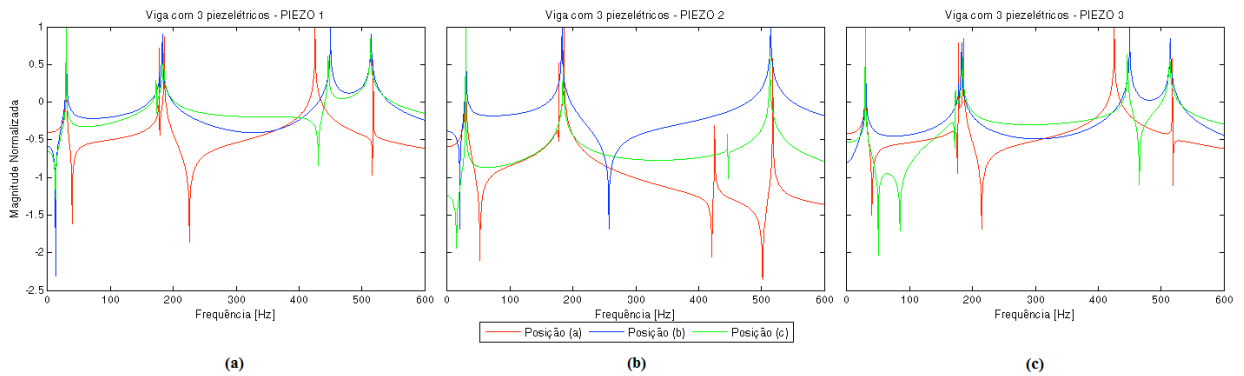


Figura 9. Comparação entre FRFs dos três piezolétricos nas três posições distintas.

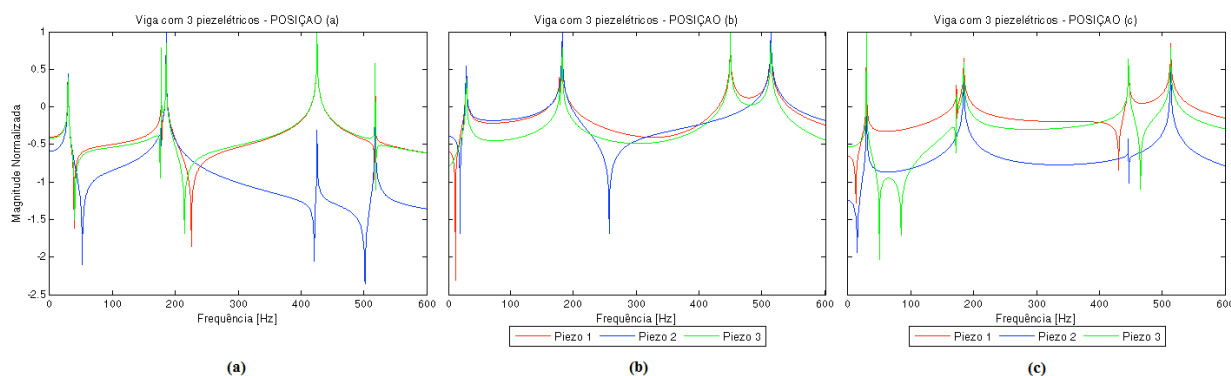


Figura 10. Comparação entre FRFs dos três piezelétricos em cada uma das posições.

6. CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos, é evidente o quão importante é a qualidade de fabricação de estruturas em materiais compósitos. Mostrou-se uma alta sensibilidade das propriedades dinâmicas frente à condição dos laminados, que podem conter vazios, fibras rompidas e/ou amassadas, entre outros defeitos de fabricação. Portanto, é de fundamental importância que se tome vários cuidados na fabricação dos corpos de prova, a fim de evitar irregularidades na estrutura que venham a modificar seu comportamento dinâmico quando comparado com o caso computacional, considerado ideal. Também, observou-se que o método de obtenção das curvas de resposta em frequência experimentais, a partir de uma entrada quase-impulsiva dada por um martelo de impacto, possui de fato uma baixa eficiência para altas frequências. A orientação do tecido de fibras de carbono no compósito mostrou influência no comportamento do corpo de prova de maneira a conferir maior resistência em direções específicas, o que pôde ser constatado pela alteração do valor da frequência natural principalmente do modo de flexão e de torção nas vigas $0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ/-45^\circ$.

Em relação aos modelos computacionais, tanto o da viga quanto o do piezelétrico se mostraram eficientes, sendo que para alguns casos o erro foi menor do que 5%. Acredita-se que no caso das vigas, as diferenças encontradas entre os resultados experimentais e computacionais sejam principalmente devido a problemas na estrutura real. Já o modelo do piezelétrico apresentou resultado bastante semelhante ao da condição de validação fornecida pelo fabricante, mesmo utilizando algumas propriedades de referência. Dessa forma, os modelos são considerados confiáveis, permitindo sua utilização nesse trabalho. Verificou-se também a aplicação de piezelétricos como sensores, percebendo uma ligação entre o posicionamento e a quantidade de piezelétricos e a sua sensibilidade aos modos de vibrar. Conclui-se que, em um estudo mais aprofundado com esses elementos, é possível encontrar configurações ótimas ou mais eficazes na função de sensoriamento modal.

Dessa forma, constatou-se uma alta potencialidade de aplicação das vigas ativas, indicando que mais esforços devem ser feitos na determinação das características dinâmicas das mesmas. Aplicações em problemas de controle ativo e incorporação de modelos validados em análise aeroelástica compreendem futuros passos a partir desse estudo.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro das agências: FAPESP, FAPEMIG e CNPQ (Instituto Nacional de C&T de Estruturas Inteligentes em Engenharia). Também ao apoio do Centro Tecnológico da TAM em São Carlos pela fabricação dos corpos de prova utilizados nos experimentos.

8. REFERÊNCIAS

- ANÔNIMO, (2008), “©Piezo Systems, Inc. CATALOG#7C”, extraído de <http://www.piezo.com/catalog.html>.
- BENT, A.A.; HAGOOD, N.W., (1997), “Piezoelectric Fiber Composites with Interdigitated Electrodes”, J. of Intelligent Materials Syst. and Struct., V. 8, n. 6, pp. 903-191.
- BROWN, T.; WOOD, K.; CHILDERS, B.; CANO, R.; JENSEN, B.; ROGOWSKI, R., (1999), “Fiber optic sensors for health monitoring of morphing aircraft”, in SPIE 6th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Newport Beach, California, USA, 1-5 Março 1999.
- CRAWLEY, E.F., (1994). Intelligent structures for aerospace: a technology overview and assessment. AIAA Journal, 32:1689–1699.
- JAFFE, B.; COOK, W.R.; JAFFE, H., (1971). Piezoelectric Ceramics. Academic Press, Londres.
- MEASURES, R.M.; OHN, M.M.; HUANG, S.Y.; BIGUE, J.; FAN, N.Y., (1998). Tunable laser demodulation of various fiber bragg grating sensing modalities. Smart Material and Structure, 7:237–247.
- MULLER, M.A., (2006), Design of an Active Fiber Composite Modal Sensor for use in a Helicopter Rotor Blade, M.Sc. Thesis, Carleton Univ., Canada.

- ROGERS, C.A., (1990). An introduction to intelligent material systems and structures. In K. P. Chong, S. C. Li, and J. C. Li, editors, *Intelligent Structures*, pp.3–41, Londres. Elsevier Applied Science.
- SIMPSON, J.O.; WISE, S.A.; BRYANT, R.G.; CANO, R.J.; GATES, T.S.; HINKLEY, J.A.; ROGOWSKI, R.S.; WHITNEY, K.S., (1998). Innovate materials for aircraft morphing. In Proc. of the 5th SPIE Annual Int. Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, CA, USA, 1-5 Março 1998.
- TROY, C.T., (1997). Fiber optic smart structures: A technology ahead of its time is finally winning acceptance. *Photonics Spectra*, 31:112–128.
- VINOGRADOV, A.; HOLLOWAY, F., (1999). Creep of thin film piezoelectric polymers PVDF. In *Applied Mechanics in Americas*, volume 7, pp. 623–626.
- WILKIE, W.K.; BRYANT, R.G.; HIGH, J.W.; FOX, R.L.; HELLBAUM, R.F.; JALINK, A.; LITTLE, B.D.; MIRICK, P.H., (2000). Low-Cost Piezocomposite Actuator for Structural Control Applications, In *Proceedings of the SPIE 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, CA, March 5-9.
- YALCINTAS, M.; DAI, H. (1999). Magnetorheological and electrorheological materials in adaptive structures and their performance comparison. *Smart Material and Structures*, v. 8, p. 560-573.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

CON10-0825 - COMPOSITE BEAM DYNAMICS WITH ACTIVE LAYER OF PZT STRIPS

Marques, F. D.; Rodrigues Filho, W. B.; Moreno, M. E.; Tita, V.
Engineering School of São Carlos of the University of São Paulo

Abstract: The design and synthesis of control systems for active aeroelastic response, particularly to reduce or eliminate the harmful effects of flutter instability still a formidable challenge. The incorporation of active control systems has enabled the exploration of novel concepts in aircraft design. However, while the aeroelastic problems could, theoretically, be eliminated with the use of techniques of control systems, its practical implementation often involves significant increase in aircraft weight. Currently, using active or smart materials has circumvented this problem. More recently, active fiber composites, made from piezoelectric material fibers/strips embedded in composites, represent a major technological breakthrough for the manufacture of aerospace intelligent structures. The aim of this work is to study composite beams with layers of PZT strips viewing applications as modal sensors or strain actuators in aeroelastic control problems. Mathematical modeling and subsequent experimental validation are considered. Initially, a finite element model for the electro-mechanical behavior of the active composite is developed. Modal tests to a composite beam are performed to validate the finite element modeling. Such approach must help developing a comprehensive finite element model of a active composite element to be applied in active aeroelastic control design.

Keywords: aeroelastic control; active fiber composites; multi-physics finite elements; active composite beams; modal analysis; piezoelectric materials.

Copyright: The authors are responsible for the content of the printed matter included in their work.