

# ANÁLISE MODAL VIA MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA VIGAS DE MATERIAL COMPÓSITO À BASE DE FIBRAS VEGETAIS<sup>1</sup>

Leandro José da Silva<sup>2</sup>  
Vânia Regina Velloso Silva<sup>3</sup>  
Alex Sander Chaves da Silva<sup>4</sup>

## Resumo

O presente trabalho visa estudar o comportamento mecânico de um compósito moldado com número variável de camadas de fibras vegetais, e avaliar a influência da orientação das fibras nas características dinâmicas de uma viga à base desse material, através de simulação computacional utilizando Elementos Finitos. Confeccionaram-se amostras por moldagem manual, utilizando-se como matriz resina epóxi e como reforço tecidos bidirecionais de fibras da *Agave Americana* (Pita ou Piteira). As propriedades mecânicas foram obtidas através de ensaios normalizados, sendo observado que todos os compósitos apresentaram resistência à tração menor que a resina epóxi quando testada sem reforço. O melhor resultado entre os compósitos foi obtido com o material moldado com 03 camadas de tecido de fibras, havendo um ligeiro acréscimo do módulo de elasticidade para esse material em relação à matriz epóxi. A análise modal foi realizada no pacote comercial ANSYS versão 5.6, onde os resultados demonstraram a influência da orientação das fibras nas freqüências naturais de vibração em vários modos de vibração. Os maiores valores de freqüência encontrados foram para as fibras orientadas a 30° nos modos de vibrar a flexão.

**Palavras-chave:** Compósitos; Fibras vegetais; Análise modal; Método de elementos finitos.

## ANALYSIS OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF A VEGETABLE FIBER REINFORCED COMPOSITE MATERIAL USING THE FINITE ELEMENTS METHOD

### Abstract

The present work seeks to study the mechanical behavior of a molded composite with variable number of vegetable fiber's layers, and analyses the dynamic properties of a cantilever beam by Finites Elements Method. Samples were made by manual molding, being used as matrix epoxy resin and as reinforcement woven bi-directional of American Agave's fibers. Test specimens with form and dimensions proposed by the standard test method ASTM D 638 - 96, which treat of the determination of tensile properties for unreinforced and reinforced plastic. All composites presented smaller traction resistance than the epoxy resin when tested without reinforcement. The best result among the composites was obtained with the molded material with 03 layers of fabric of fibers, having a quick increment of the modulus of elasticity for that material in relation to the epoxy matrix. The modal analysis was made in the software ANSYS 5.6, for a beam molded with 4 fiber's layers. The bigger values of natural frequency were obtained for the flexural mode shape with the fibers aligned to 30°. In general the results show an influence of fibers orientation in natural frequencies.

**Key-words:** Composites; Vegetable fibers; Modal analysis; Finites elements method.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

<sup>2</sup> Bolsista de Iniciação Científica, programa PIBIC/FAPEMIG. Graduando em Engenharia Industrial Mecânica pela UFSJ – Universidade Federal de São João Del Rei – leandrojosesilva@gmail.com.

<sup>3</sup> Eng. Mecânica pela FUNREI, Mestre em Engenharia Mecânica pela PUC, Doutora em Engenharia Mecânica pela USP, Professora do Departamento de Mecânica da UFSJ – Universidade Federal de São João Del Rei – velloso@ufsj.edu.br.

<sup>4</sup> Eng. Mecânico pela FUNREI, Mestre em Engenharia Mecânica pela USP, Doutor em Engenharia Mecânica pela USP – achaves@ufsj.edu.br.

# 1 INTRODUÇÃO

Compósitos formados por matrizes poliméricas e fibras vegetais surgiram na última década com um grande potencial de aplicação, constituindo na atualidade, uma das maiores áreas de interesse na pesquisa de materiais compósitos. Segundo Silva <sup>(1)</sup>, este interesse surgiu com mais intensidade devido à busca crescente por materiais de baixo custo, provenientes de fontes renováveis de matérias-primas que não causem danos ao meio ambiente e possam competir com os materiais tradicionais, ao alto preço das fibras sintéticas e às exigências das autoridades legislativas quanto ao uso e destino final dessas fibras e resinas derivadas do petróleo, e também devido à maior conscientização dos próprios consumidores da necessidade de preservação do ambiente e de fontes naturais.

Até o presente, quase todo o desenvolvimento de materiais compósitos teve como objetivo as aplicações estruturais. Estes materiais, devido à sua complexa microestrutura, são de difícil caracterização. Deve-se levar em conta, na avaliação das propriedades mecânicas, vários fatores relacionados com geometria do reforço, quantidade de reforço presente no compósito e, além disso, a complexidade da interação entre o reforço e a matriz. Para materiais compósitos reforçados por fibras, o arranjo das fibras é a característica mais atraente. Isso porque as propriedades podem variar de acordo com a orientação das fibras, ou seja, a anisotropia do compósito pode permitir ao projetista desenvolver as propriedades do material juntamente com as características geométricas da peça, de modo a se obter o melhor desempenho.

A determinação de propriedades de compósitos pode ser feita basicamente por duas formas, uma analítica em que se pode chegar às propriedades do compósito através das propriedades individuais de seus componentes, ou através de ensaios mecânicos experimentais normalizados.

Um caso particularmente simples de método analítico de solução aproximada que considera as propriedades do compósito como a média ponderada em volume das propriedades dos constituintes, é a Regra das Misturas. Entretanto, a Regra das Misturas dá bons resultados somente em certas situações simples, como na determinação da densidade do compósito. No caso das propriedades mecânicas, segundo a literatura, existem certas restrições à sua aplicabilidade. Se for necessária uma informação mais precisa, é melhor utilizar-se de métodos mais sofisticados baseados na Teoria da Elasticidade.

No caso de determinação de propriedades através de ensaios mecânicos, segundo Silva, <sup>(1)</sup> as propriedades mecânicas de maior interesse são: resistência à tração, compressão, flexão, impacto, fadiga, e abrasão, além do módulo de elasticidade em tração e flexão, dureza e tenacidade à fratura. Algumas normas podem ser aplicadas tais como a ASTM D3039 e ASTM D638<sup>(2)</sup> para tração, sendo a primeira indicada para materiais compósitos laminados reforçados por fibras de alto módulo e a segunda mais abrangente.

Segundo Titã, <sup>(3)</sup> Além do comportamento mecânico o conhecimento do comportamento dinâmico dos componentes feitos de materiais compósitos pode ser importante e contribuir na determinação de seu comportamento sob um determinado carregamento. Procurando-se, evitar danos estruturais que possam ser causados por vibrações, busca-se nos projetos determinar as propriedades que caracterizam o comportamento dinâmico de uma estrutura sob a ação de cargas variáveis:

1. As frequências naturais da estrutura para evitar que a excitação de trabalho normal esteja próxima das mesmas;
2. Os modos normais de vibrar para reforçar os pontos mais flexíveis ou para aliviar o peso ou ainda para incrementar amortecimento;
3. Os fatores de amortecimento modais.

Segundo Lofrano,<sup>(4)</sup> a determinação das características dinâmicas de uma dada estrutura pode ser realizada através de dois procedimentos. O primeiro é denominado de Análise Modal Teórica e consiste na formulação de um modelo matemático da estrutura em estudo através de uma técnica de discretização. Neste caso, o Método dos Elementos Finitos é largamente utilizado na obtenção das matrizes físicas de massa e rigidez da estrutura. Estas matrizes são então utilizadas na formulação de um problema de autovalores e autovetores cuja solução fornece as frequências naturais e modos normais de vibração da estrutura. Estes resultados constituem o chamado modelo modal teórico e podem ser posteriormente utilizados na obtenção de níveis de resposta a carregamentos dinâmicos conhecidos, na determinação de características de resposta em frequência e impulsiva e na correlação com dados experimentais.

O segundo procedimento é denominado de Análise Modal Experimental e busca através de dados experimentais a determinação das frequências naturais, fatores de amortecimento modais e modos de vibrar. Dentre as aplicações da análise modal experimental, a mais comum é a validação de um modelo teórico para uma dada estrutura. Através de ensaios experimentais são obtidas as características da resposta do sistema, que são geralmente dadas através de Funções de Respostas em Frequência (FRFs) ou resposta impulsiva, MAIA et al.<sup>(5)</sup>

As FRFs relacionam a resposta do sistema geralmente expressa por deslocamentos, velocidades ou acelerações com as entradas aplicadas ao mesmo, que geralmente são dadas por forças lineares. Essas entradas e saídas podem ser referentes a graus de liberdade de translação, como, por exemplo, força e deslocamento, como também aos graus de liberdade de rotação, por exemplo, ângulo e momento, McConnell.<sup>(6)</sup>

Nesse trabalho o objetivo é avaliar as propriedades mecânicas de um compósito de matriz polimérica reforçada por fibra vegetal, investigando a influência do número de camadas de fibras, através de ensaios normalizados; além do estudo das propriedades dinâmicas de uma viga através de simulação numérica utilizando um pacote comercial de elementos finitos, investigando a influência da orientação das fibras nas frequências naturais e nos seus respectivos modos de vibração.

## 2 MATERIAIS

Estudou-se compósitos reforçados com fibras da *Agave americana*, planta cujo nome popular é Pita (ou Piteira), mostrada na Figura 1.



Figura 1: *Agave americana*

Os compósitos, laminados, foram confeccionados com 1, 2 e 3 camadas de tecido das fibras sendo uma camada orientada a 90° em relação à outra. Foram utilizados fios de fibras de diferentes espessuras para a confecção dos tecidos, a fim de se obter compósitos com frações volumétricas de fibras aproximadamente iguais. A Figura 2

mostra o aspecto de um tecido utilizado para a montagem do compósito com 4 camadas de fibras, considerando-se que o tecido é composto de 2 camadas ortogonais de fibras.



**Figura 2:** Tecido de fibras da *Agave americana*.

A matriz polimérica utilizada foi a resina epóxi Araldite LY - 1553 com o Catalisador HY 956, misturados em uma proporção em peso de 5/1.

### 3 MÉTODOS

Através da técnica de moldagem manual, corpos de prova, Figura 3, tanto dos compósitos nas diversas condições analisadas, quanto da resina sem reforço, foram preparados para a realização de ensaios de tração.

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D638-96, em uma máquina de ensaios Emic DL2000 com célula de carga de 500 kgf, utilizando o programa Tesc versão 3.01.



**Figura 3:** Ensaio de Tração.

A análise dinâmica através do método de elementos finitos tem o objetivo de prever o comportamento dinâmico do compósito caso esse seja aplicado em situações em que o conhecimento desse comportamento seja importante para prevenir causas indesejáveis causadas por vibrações. Com esse conhecimento pode-se projetar o componente com a melhor disposição das fibras de tal forma que ele seja mais resistente a um determinado carregamento previsto.

Com as propriedades elásticas do compósito gera-se um modelo teórico e obtêm-se as matrizes de massa e rigidez da estrutura discretizada. Sendo assim, através da solução das equações de movimento e desconsiderando o efeito de amortecimento torna-se possível estimar as frequências naturais desamortecidas e os seus respectivos modos de vibrar.

O presente problema foi solucionado no software ANSYS® 5.6, seguindo as três etapas essenciais para a utilização do método dos elementos finitos: etapa de pré-processamento, solução (*Solver*) e etapa de pós processamento.

A primeira etapa da modelagem das amostras é a construção da geometria que se trata de vigas finas, estreitas e longas. As dimensões foram 400; 25 e 2,8 mm para o comprimento, altura e espessura da viga; respectivamente.

Logo após, especifica-se as propriedades do material, que para este caso é considerado ortotrópico e necessita dos valores de  $E_1$  (módulo de Young paralelo à fibra –  $E_x$ ),  $E_2$  (módulo de Young perpendicular à fibra –  $E_y$ ),  $E_3$  (módulo de Young perpendicular à lâmina –  $E_z$ ),  $V_{12}$  (coeficiente de Poisson –  $V_{xy}$ ),  $G_{12}$  e  $G_{23}$  (módulos de cisalhamento –  $G_{xy}$ ,  $G_{yz}$  e  $G_{xz}$ ) e a  $\rho_c$  (densidade do compósito). As propriedades utilizadas na análise foram do compósito moldado com 2 tecidos de fibras de Piteira, ou seja 4 camadas de fibras. A Tabela 1 mostra os valores das respectivas propriedades utilizadas no cálculo numérico.

**Tabela 1:** Propriedades do compósito simulado via MEF

Lâmina de compósito ortotrópica	
Módulo de Elasticidade [MPa]	
Paralelo a fibra ( $E_1$ )	556,3
Perpendicular a fibra ( $E_2$ )	402,9
Módulo de cisalhamento [MPa]	
$G_{12}$	213,96
$G_{23}$	154,96
Coeficiente de Poisson	0.3
Densidade [ $\text{kg/m}^3$ ]	1045

Das propriedades listadas na tabela acima somente os módulos de elasticidade foram determinados em ensaios experimentais, sendo os módulos de cisalhamento calculados adotando-se condições isotrópicas e o coeficiente de Poisson foi adotado o de um compósito feito com a mesma matriz, porém utilizando fibra de vidro.

O elemento finito utilizado na análise foi o SHELL93, que permite a escolha do ângulo de orientação da fibra bem como a espessura da lâmina de compósito. O SHELL93 possui 8 nós no total, sendo três por aresta e cada um possuindo 6 graus de liberdade, translação e rotação em torno dos eixos x, y e z.

Como condições de contorno, vinculações de engastamento são colocadas numa das extremidades do modelo, simulando o engastamento da viga na base rígida. Não é aplicado nenhum carregamento uma vez que a análise modal não exige tal fator, e também não são impostas condições iniciais ao modelo. A Figura 4 mostra o modelo discretizado já com as vinculações de engastamento.

Assume-se que o estudo é unidimensional, ou seja, o comportamento da viga é analisado somente numa direção. De acordo com o sistema de coordenadas adotado pelo ANSYS, tem-se que essa direção é a Z.

Após a etapa de preparação do modelo, a solução é executada automaticamente pelo solver do ANSYS. Os resultados são divididos em dois grandes grupos, ou seja, as frequências naturais desamortecidas e os seus respectivos modos de vibrar para os diversos casos analisados.

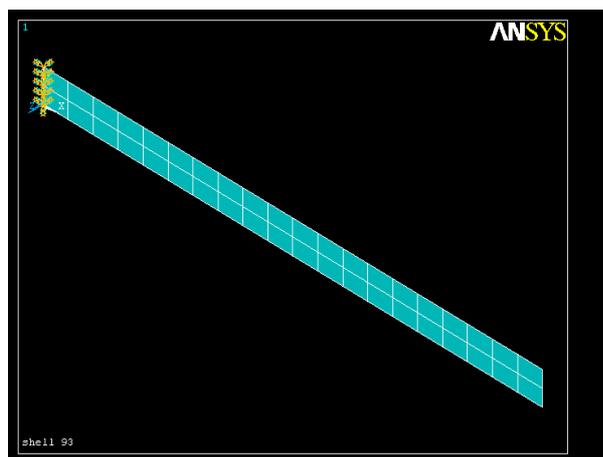


Figura 4: Modelo de viga discretizado no ANSYS

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As principais características geométricas dos materiais e os valores médios das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios são listados na Tabela 2.

Todos os compósitos apresentaram densidade menor que a resina epóxi, sendo essa uma das principais vantagens das fibras vegetais, quando incorporadas a materiais poliméricos para formação de compósitos, a desmaterialização. O compósito de melhor adequação a essa tendência foi o formado por três camadas de tecidos de pita.

Tabela 2: Propriedades dos materiais

Propriedades		Resina epóxi	Compósito de Palha de milho	Compósitos de fibra de Pita			
				02 camadas	04 camadas	06 camadas	04 camadas transversais
Fração Vol. (%)		-	21	29	28	26	30
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]		1,154	1,063	1,03	1,045	1,02	1,054
Tração	Tensão de Ruptura [MPa]	48,38	17,22	30,86	35,57	38,43	18,58
	Mód. Elasticidade [MPa]	620,1	403,2	537,5	556,3	632,4	402,9
	Deformação	0,10016	0,06542	0,0799	0,0878	0,08392	0,07232

Com o emprego de tecidos com menor quantidade de fibra por fio, foi possível diminuir a quantidade de fibras na direção transversal do laminado e aumentar a quantidade de fibras na direção principal. Dessa forma aproximou-se mais da condição de reforço unidirecional, onde segundo a literatura a melhor eficiência do reforço por fibras alinhadas é alcançada. Essa é uma das razões que explicam o melhor desempenho do compósito moldado com 6 camadas de fibras de Pita. Outra justificativa para esse melhor desempenho é o fato de com camadas mais finas, a molhabilidade das fibras pela resina aumenta, embora uma observação da superfície de fratura por microscopia eletrônica de varredura não tenha sido realizada. Com isso há uma maior transmissão de esforço para as fibras aumentando, conseqüentemente, o desempenho da fibra. Além disso, os pontos de entrelaçamento dos fios menos grosseiros nos tecidos mais finos, tornam as fibras mais alinhadas o que contribui para um melhor comportamento das mesmas.

O compósito moldado apenas com um tecido foi o que apresentou menor tensão de ruptura. No entanto, é o que possui melhores condições de isotropia, uma vez que foi utilizado tecido com a mesma quantidade de fibras em ambas as direções principais no

plano do laminado. Já os compósitos que foram moldados com 04 e 06 camadas de fibras são mais anisotrópicos. Isso porque o espaçamento dos fios do urdume do tecido foi mantido o mesmo para todos os tecidos acarretando em uma diminuição de fibras nessa direção e um aumento na direção de trama. Assim o compósito quando testado na direção de urdume apresentou menor resistência.

Em relação ao módulo de elasticidade, houve um melhor comportamento dos compósitos, comparativamente ao da resina epóxi. O compósito com 06 camadas de fibra de pita apresentou módulo ligeiramente superior ao da resina.

Em relação à deformação foi observado que ambos os compósitos romperam com níveis de deformação menores ao apresentado pela resina quando testada sem reforço. O valor de deformação aumentou ao passar de 2 para 4 camadas de fibras no compósito, e posteriormente diminuiu para o moldado com 6 camadas.

Em relação à análise modal realizada para o compósito moldado com fibras de Pita, os resultados das diversas frequências naturais da viga e seus respectivos modos de vibração, Figura 5, são listados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Frequências naturais em função da orientação das fibras no compósito

	Frequências naturais [Hz]/Ângulo de orientação das fibras			
	0°	30°	45°	90°
<b>Modos à flexão</b>				
1°	2,075	2.089	2,03	1,764
2°	12,985	13,076	12,706	11,042
3°	36,32	36,569	35,532	30,887
4°	71,113	71,568	69,538	60,469
5°	117,475	118,153	114,77	99,878
6°	175,389	176,27	171,201	149,094
7°	244,856	245,881	238,773	208,118
8°	325,886	326,963	317,465	276,963
9°	418.51	419,512	407,286	355,663
<b>Modos à torção</b>				
1°	58,016	53.669	52,585	57,424
2°	174,399	161,394	158,143	172,519
3°	291,827	270,274	264,773	288,354
4°	410,977	381,045	373,17	405,41
5°	-	494,414	483,979	-
<b>Vibração lateral</b>				
1°	18,391	18,544	18,029	15,658
2°	113,102	113,735	110,585	96,631
3°	307,967	308,479	299,969	264,441

Pode-se observar, que entre os casos testados, o melhor desempenho foi o do compósito contendo fibras alinhadas a 30° para os modos de vibrar a flexão e os modos de vibração lateral, registrando os maiores valores de frequências naturais. Para esses mesmos modos de vibrar, as frequências diminuem com as orientações de 45 e 90°, respectivamente. Já para os modos de vibração a torção encontrados na faixa de frequência de 0 a 500 Hz, esses foram maiores para as fibras orientadas a 0 e 90°, sendo maiores para o primeiro caso. Tais resultados divergem do esperado uma vez que se esperava que as fibras orientadas a 45° contribuíssem para uma maior rigidez do compósito quando sujeito às forças cisalhantes.

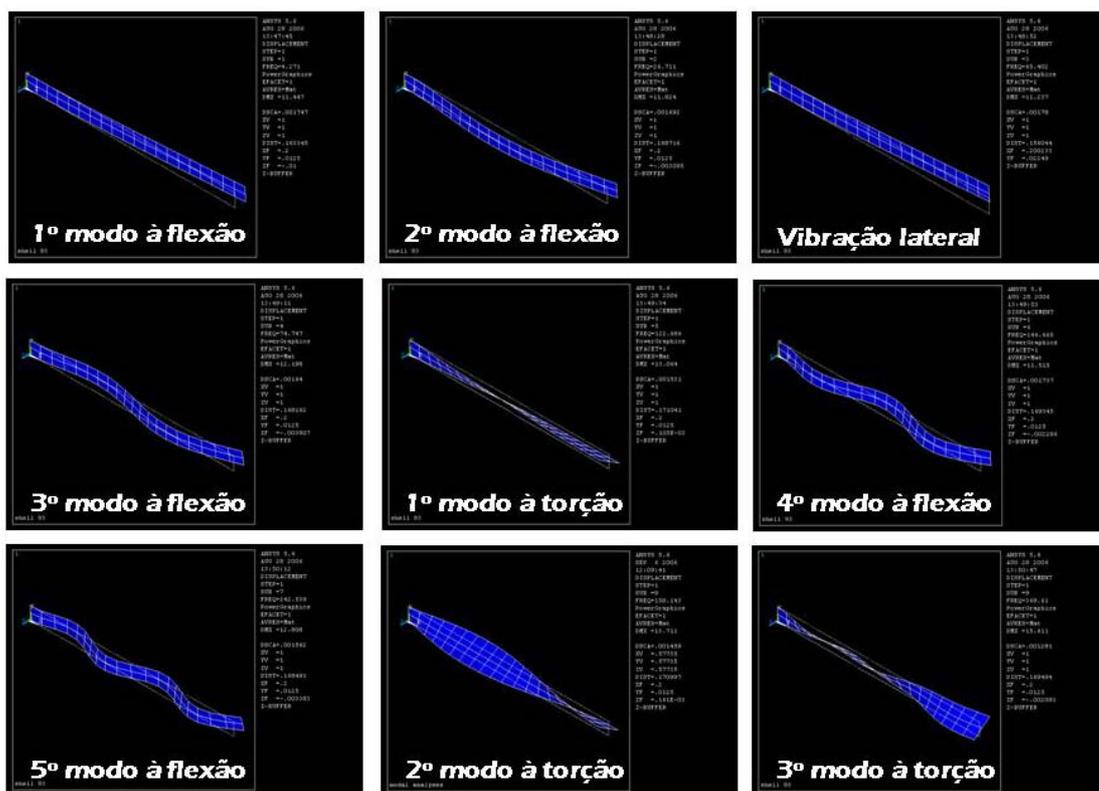


Figura 5: Principais modos de vibração

Contudo esses resultados são apenas ilustrativos já que a simulação foi realizada com propriedades do compósito moldado com 4 camadas ortogonais de fibras, sendo que o software trabalha apenas com uma camada e ainda admite que as fibras são dispostas unidirecionalmente na lâmina. As propriedades especificadas também são valores aproximados, uma vez que nos ensaios de tração só foi determinado o módulo de elasticidade sendo as outras propriedades estimadas admitindo-se condições isotrópicas. Resultados mais consistentes podem ser encontrados realizando a simulação com propriedades de um compósito com reforço unidirecional e também com uma caracterização mais criteriosa das suas propriedades através de ensaios mecânicos.

## 5 CONCLUSÃO

O compósito com 3 camadas de tecidos de fibras apresentou o melhor desempenho entre os compósitos testados, verificando-se uma tendência de melhoria das propriedades mecânicas na medida em que o número de camadas de fibras no compósito aumenta. Pode-se concluir então que para compósitos reforçados com tecidos, estes devem ser produzidos com fios da menor espessura possível de modo a se conseguir um compósito com maior número de camadas. Com isso, a adesão entre fibras e matriz é melhorada aumentando a eficiência do reforço.

O que se pode concluir também, é que quanto menor a quantidade de fibras perpendiculares à direção de carregamento melhor é o comportamento do compósito, aproximando mais da condição de reforço unidirecional que é a mais eficiente. No entanto para reforço bidirecional na forma de tecido a quantidade de fibras na direção de trama e de urdume devem ser a mesma para se obter um compósito com propriedades mecânicas iguais em ambas as direções.

Em relação ao comportamento dinâmico os diferentes valores das frequências naturais para as diferentes orientações, comprovam a influência desta no comportamento dinâmico das vigas feitas de material compósito a base de fibra orgânica. Portanto, pode-se concluir que para atender a certo requisito do projeto de um componente mecânico

feito à base de material compósito, não é necessária a adição de massa ou a mudança de sua geometria para que as suas propriedades sejam alteradas. Isto faz com que os materiais compósitos sejam de grande interesse para áreas de engenharia onde se tem por objetivo obter componentes com baixo peso estrutural associado com grande resistência mecânica.

## **Agradecimentos**

À FAPEMIG, pelo apoio financeiro;

Aos colegas, técnicos e professores do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João Del Rei, que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretana derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003, 139p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- 2 American Society for Testing and Materials. (1996). Standard Test Methods for Tensile Properties Plastics. ASTM D638-96.
- 3 TITA, V. **Análise dinâmica teórica e experimental de vigas fabricadas a partir de materiais compósitos poliméricos reforçados**. 1999, 119p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- 4 LOFRANO, M. **Técnicas para estimativa de FRFs angulares em análise modal experimental com aplicações a estrutura do tipo viga**. 2003, 152p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- 5 MAIA N. M. M. et. al (1997). **Experimental Modal Analysis**. Taunton, England, Research Studies Press Ltda, John Wiley and Sons Inc.
- 6 McCONNELL K. G. **Vibration Testing**. Taunton, England, Research Studies Press Ltda, John Wiley and Sons Inc.