

7. ANÁLISE DA FREQUÊNCIA NATURAL EM VIGAS COMPÓSITAS COM FIBRA DE VIDRO E EMBEBIDAS COM FIOS DE SMA

Vailton Alves Faria²², José Lopes Soares Neto²³, Edson Paulo da Silva²⁴, Ailton Gutemberg Macedo de Medeiros²⁵.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise da frequência natural em uma viga compósita com reforço de fibra de vidro e embebida com fios com memória de forma. O estudo é desenvolvido considerando-se três diferentes combinações de fração volumétrica de reforço. Para cada combinação analisa-se a influência da fração volumétrica de fios com memória de forma sob diferentes condições de contorno. Os resultados ilustram como os fios com memória de forma podem ser empregados para influenciar a frequência natural de vibração de estruturas compósitas híbridas.

Palavras-chave: materiais compósitos, ligas com memória de forma, controle de vibração;

ABSTRACT.

This work presents a theoretical study of natural frequency of composite beams embedded with shape memory wires. The study is developed considering three different matrix/reinforcement combinations. For each combination the influence of the volume fraction of shape memory wires is analyzed under different boundary conditions. The results illustrate how shape memory wires can be applied to influence the natural frequency of composite structures.

Keywords: Composite materials, shape memory alloys, control of vibration.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos têm-se proposto o emprego de ligas com memória de forma (SMA – *Shape Memory Alloys*) para o desenvolvimento de estruturas adaptativas (Janoch, 1999; Gandhi et al, 1994; Srinivasan et. al, 2001). Entre os materiais funcionais as SMAs têm grande potencial de aplicação em situações que envolvem grandes forças, grandes deformações e baixas frequências. Nesta linha de pesquisa identificam-se basicamente duas tendências: i) aplicação de SMA para controle de forma (Sanders et al., 2004; Chandra, 2001)

²² Professor da Faculdade Católica do Tocantins – vailton@catolica-to.edu.br

²³ Professor da Faculdade Católica do Tocantins – vailton@catolica-to.edu.br

²⁴ Professor da Universidade de Brasília – dasilva@unb.br

²⁵ Acadêmico da Faculdade Católica do Tocantins – Curso de Engenharia Elétrica - a.gutemberg@gmail.com

e, ii) aplicação de SMA para controle de vibração em máquinas e estruturas (Zak, et al., 2003; Oh et al., 2001; Saadat et al., 2001).

Um dos trabalhos pioneiros sobre o emprego de SMA no controle de vibração foi apresentado por Jia e Rogers (1989). Eles propuseram dois conceitos para o controle estrutural: sintonização ativa de propriedades (APT - *Active Properties Tuning*) e sintonização ativa de energia de deformação (ASET - *Active Strain Energie Tuning*). No princípio APT o elemento com memória de forma é embebido numa estrutura compósita. Uma vez que o módulo de elasticidade dessas ligas varia enormemente com a temperatura, controlando-se o aquecimento torna-se possível, portanto, controlar a rigidez da estrutura como um todo. O princípio ASET baseia-se no mesmo mecanismo. Aqui, entretanto, os elementos com memória de forma são pré-deformados, dessa forma, têm-se mais um parâmetro que é a tensão de recuperação de forma gerada durante o aquecimento. Schetky (1992) considera ainda o controle ativo de forma (ASC - *Active Shape Control*). Neste caso, elementos com memória de forma pré-deformados são montados a certa distância do eixo neutro da estrutura. Quando aquecidos os momentos gerados na recuperação de forma dos atuadores deformam a estrutura. Desta forma, pode-se controlar a forma da estrutura controlando-se o aquecimento dos atuadores. Baz et al. (1993) propuseram o emprego de fios com memória de forma como reforçadores numa viga compósita, na qual eles atuam como sensores cujos sinais permitem um monitoramento contínuo da deflexão da viga. Resultados teóricos e experimentais mostram a potencialidade das SMA para controle de vibrações. Nos últimos 15 anos, vários trabalhos com foco na aplicação de SMA para controle de vibração em máquinas e estruturas têm sido desenvolvidos

(Choi and Hwang, 2000; Willians et al, 2002). Gotthardt e Bidaux (1998) investigaram a aplicação de reforçadores com memória de forma em compósitos. O objetivo era controlar a vibração através da variação das propriedades mecânicas do sistema através da ativação dos reforçadores com memória de forma. Shahin et al (1997) propôs a aplicação de tendões com memória de forma para o controle ativo de vibração em estruturas. Fios com memória de forma são empregados por Da Silva e Mesquita (2000) para o controle de vibração de uma viga engastada explorando em ambos os efeitos de memória de forma e pseudoelástico. Nagaya et al (1997) propõe um método para controle ativo de vibrações de um eixo através da variação da rigidez de suportes com memória de forma. Willians et al. (2002) exploram o módulo variável das SMA para desenvolver um sistema adaptativo-passivo para controle de vibração.

Lau (2002) desenvolveu um estudo teórico-experimental sobre o comportamento dinâmico de uma viga compósita com fios de SMA embebidos, sob diferentes condições de contorno. Ele analisou teórico e experimentalmente a frequência natural e o amortecimento de uma viga Epóxi/Fibra de vidro e reforçada com fios de NiTi embebidos na camada intermediária central. A resposta do sistema foi analisada considerando diferentes condições de contorno com os fios de NiTi nos estados martensítico e austenítico. Verificou-se que no estado martensítico a frequência natural diminui com o aumento do número de fios. Já no austenítico observa-se o oposto. Experimentalmente foi observado que o amortecimento aumenta com a temperatura dos fios de SMA.

O presente trabalho é uma extensão do estudo apresentado por Lau (2002), aqui foram consideradas diferentes combinações de fração volumétrica de fibra de vidro com fios de SMA. Para cada uma das combinações determinou-se a frequência natural de vibração considerando-se os fios de SMA nos estados martensítico e austenítico e sob as diferentes condições de contorno da viga. Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se o modelo para SMA proposto por Brinson (1993). Os resultados obtidos ilustram como as propriedades termomecânicas das SMAs podem ser exploradas para o desenvolvimento de sistemas de controle de vibração baseado no comportamento termomecânico das SMAs.

MODELAGEM DA VIGA COMPÓSITA

A modelagem utilizada no presente trabalho é a mesma apresentada por Lau (2002). A viga compósita é constituída de uma matriz polimérica (Epóxi) reforçada com fibras de carbono, vidro e kevlar, e com fios de SMA embebidos na camada intermediária central da viga, Figura 1a. Foram consideradas três diferentes condições de contorno: bi-engastada - condição FF (Figura 1b), engastada em uma extremidade e livre na outra - condição FL (Figura 1c) e bi-apoiada - condição LL (Figura 1d). Para as condições FL e LL considerou-se os fios de SMA em estado livre de tensões e deformações. No caso da viga bi-engastada foram considerados dois casos: i) fios de SMA sem pré-deformação e ii) fios de SMA pré-deformados em 4%.

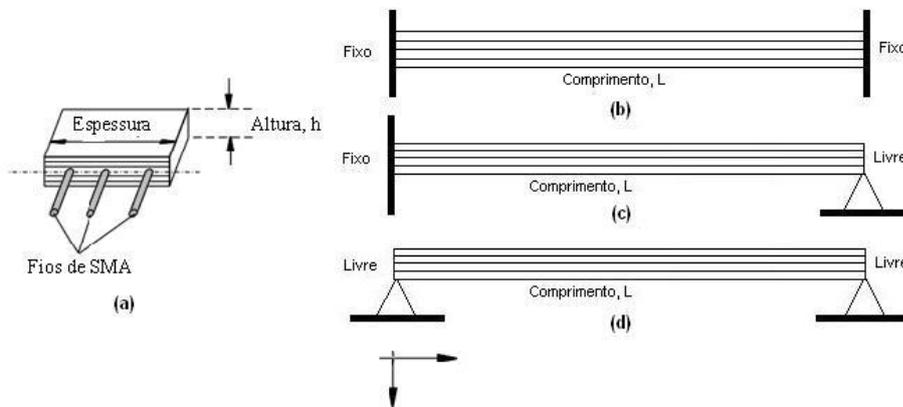


Figura 1. a) Viga compósita com fios de SMA embebidos. b) FF, c) FL). d) LL.

Para desenvolver a análise da frequência natural a viga híbrida é submetida a uma vibração livre a partir de um deslocamento inicial y_{max} imposto na região central ($x = L/2$).

Força de Recuperação dos Fios de SMA

Na condição de contorno FF (viga bi-engastada) com fios de SMA pré-deformados ter-se-á, quando do aquecimento, o desenvolvimento de uma força de recuperação devido ao fato

do material tentar recuperar a sua forma original, e ser impedido pelos engastamentos. Para se determinar esta força utilizou-se neste trabalho o modelo para SMA proposto por Brinson (1993).

Considerando o diagrama apresentado na Figura 1b tem-se que a força atuante na estrutura compósita é dada pela força de recuperação F_{rec} gerada pela recuperação da pré-deformação dos fios de SMA, e uma força térmica $F_{term.}$, associada à variação térmica da deformação no compósito e nos fios de SMA (Lau et al, 2002). Logo:

$$F_{SMA} = F_{rec.} - F_{term.}, \quad (1a)$$

$$F_{SMA} = F_{rec.} - (E_{comp.} \cdot \alpha_{comp.} \cdot b \cdot w + \Theta(\xi)) \Delta T, \quad (1b)$$

onde E_{comp} é o módulo elástico trativo e α_{comp} o coeficiente de dilatação térmica da viga compósita respectivamente, $\Theta(\xi)$ o coeficiente de dilatação dos fios de SMA e ΔT a variação de temperatura da viga como um todo, ou seja, da viga compósita e dos fios de SMA.

Comportamento termomecânico dos fios de SMA

O complexo comportamento termomecânico das SMA está associado às transformações de fase martensítica, e é fortemente dependente da temperatura. Para determinar a força F_{rec} utilizou-se neste trabalho o modelo para SMA proposto por Brinson (1993), para o qual a equação constitutiva é dada por:

$$\sigma - \sigma_0 = D(\xi)(\varepsilon - \varepsilon_0) + \Theta(T - T_0) + \Omega(\xi)(\xi - \xi_M), \quad (2)$$

onde σ é a tensão, ε a deformação, T a temperatura e ξ a fração volumétrica de martensita. Ω , D e Θ representam o tensor de transformação de fase, o módulo de elasticidade, e o coeficiente de expansão térmica da liga respectivamente. σ_0 , ε_0 , ξ_0 e T_0 representam o estado termomecânico inicial. A evolução de ξ em função da temperatura T é dada pelas seguintes relações (Liang and Rogers, 1997):

$$\xi = \frac{\xi_M}{2} \{ \cos[a_A (T - A_S)] + 1 \}, \quad (3a)$$

$$\xi = \frac{1 + \xi_A}{2} \{ \cos[a_M (T - M_S)] \} + \frac{1 + \xi_A}{2}, \quad (3b)$$

onde

$$a_A = \frac{\pi}{A_f - A_s}, \quad (4a)$$

$$a_M = \frac{\pi}{M_s - M_f}, \quad (4b)$$

são constantes positivas das SMAs. A Eq. (3a) descreve a evolução de ξ durante o resfriamento, ou seja, descreve a formação de martensita a partir da austenita (transformação direta). Já a Eq. (3b) descreve a evolução de ξ durante o aquecimento, ou seja, descreve a formação de austenita. Para a determinação do módulo elástico e do coeficiente de expansão térmica da liga utiliza-se a regra da mistura.

$$D(\xi) = \xi D_M + (1 - \xi) D_A, \quad (5a)$$

$$\Theta(\xi) = \xi \Theta_M + (1 - \xi) \Theta_A, \quad (5b)$$

onde D_M , D_A , Θ_M e Θ_A representam os módulos de elasticidade e os coeficientes de expansão térmica das SMAs nas fases martensítica e austenítica respectivamente.

Uma das situações analisadas neste trabalho é o da viga compósita bi-engastada com fios de SMA pré-deformados e embebidos na matriz. Considerando o modelo de Brinson (1993) Lau et al. (2002) calculou que a tensão de recuperação nos fios de SMA é dada por:

$$\sigma(\xi) = \frac{\{ \alpha D(\xi) + \Theta(\xi) \} (T - T_0) + \Omega(\xi) (\xi - \xi_M)}{1 - \frac{D(\xi) N \pi d^2}{4 E_{comp} A_{comp}}}, \quad (6)$$

onde N é o número de fios de SMA e d o diâmetro de cada fio de SMA. α é o coeficiente expansão térmica do material compósito (matriz/fibra), e T_0 temperatura ambiente. Para obtenção da Eq. (6) considerou-se a hipótese de uma união perfeita entre os fios de SMA e a matriz compósito. Nesta condição pode-se então garantir que as deformações nos fios de SMA e na matriz compósito são iguais (Lau et al, 2002).

Determinação das frequências naturais da viga

O comportamento vibratório lateral de uma viga compósito com seção transversal uniforme, embebida com fios de SMA pode ser analisado pela equação diferencial de quarta ordem dada por (Lau et al, 2002):

$$E_B I_B \frac{d^4 y(x)}{dx^4} + \sigma_R(\xi) \frac{N \pi d^2}{4} \frac{d^2 y(x)}{dx^2} - \rho_B \omega_n^2 y(x) = 0, \quad (7)$$

onde o subscrito B representa as propriedades da viga (matriz/reforço e fios de SMA). ρ é a densidade da viga por unidade de comprimento e ω_n sua frequências natural. Para determinar o módulo elástico e a densidade da viga pode-se usar a regra da mistura da seguinte forma:

$$E_B = E_1 + (D(\xi) - E_1) \frac{A_{SMA}}{A_{Total}}, \quad (8a)$$

$$\rho_B = \rho_C + (\rho_{SMA} - \rho_C) \frac{A_{SMA}}{A_{Total}}, \quad (8b)$$

onde A_{SMA} e A_{Total} representam área total da seção transversal dos fios de SMA embebidos, e a área da viga compósito respectivamente. As propriedades do material compósito são identificadas pelo subscrito c .

A solução da Eq. (7) será obtida para as três diferentes condições de contorno FF, FL e LL. Para a viga bi-engastada (condição de contorno FF) a deflexão e a declividade são nulas nas extremidades, ou seja:

$$y(x) = 0 \Big|_{x=0,L}, \quad (9a)$$

$$\frac{\partial y(x)}{\partial x} = 0 \Big|_{x=0,L}, \quad (9b)$$

Assim, a solução geral da Eq. (9) é dada por:

$$y(x) = A \cosh(\beta_1 x) + B \sinh(\beta_1 x) + C \cosh(\beta_2 x) + D \sinh(\beta_2 x). \quad (10)$$

A derivada primeira da Eq. (10) em relação a x é:

$$\frac{dy(x)}{dx} = -\beta_1 (A \sinh(\beta_1 x)) + B (\cosh(\beta_1 x)) - \beta_2 (\sinh(\beta_2 x)) + \beta_2 (\cosh(\beta_2 x)), \quad (11)$$

onde

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{\sqrt{a^2 - 4b}}{2} + \frac{a}{2}}, \quad \beta_2 = \sqrt{\beta_1 - a}, \quad (12a)$$

$$a = -\frac{\sigma_R(\xi) N \pi d^2}{4E_B I_B}, \quad b = -\frac{\rho_B \omega^2}{E_B I_B}. \quad (12b)$$

Aplicando-se as condições de contorno (9) para $x = 0$ nas equações (10) e (11) obtém-se as seguintes expressões para as constantes A e B :

$$A = -C, \quad (13a)$$

$$B = -D \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} \right). \quad (13b)$$

Substituindo agora os valores de A e B nas equações (10) e (11) para $x = L$ obtém-se a seguinte relação:

$$2\beta_1(1 - \cosh(\beta_1 L) \cos(\beta_2 L)) + \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2} - \beta_2 \right) (\sinh(\beta_1 L) \sin(\beta_2 L)) = 0 \quad (14)$$

A Eq. (14) pode ser reescrita como função da frequência natural ω_n . E por meio de procedimentos numéricos pode-se obter ω_n da viga compósita para diferentes frações volumétricas de fios de SMA. Neste trabalho utilizou-se o Matlab para se chegar às raízes da Eq. (14). Para a condição de contorno FF obteve-se:

$$\omega_n = \sqrt{(\beta L)^4 \frac{E_B I_B}{\rho_B L^4}}. \quad (15)$$

Para a condição de contorno LL tem-se que os deslocamento e momento fletor são nulos nas extremidades de viga, ou seja,

$$y(x) = 0 \Big|_{x=0,L}, \quad (16a)$$

$$\frac{\partial^2 y(x)}{\partial x^2} = 0 \Big|_{x=0,L}. \quad (16b)$$

Calculando a segunda derivada da Eq. (12) em relação a x , e aplicando o resultado na Eq. (16) obtém-se a seguinte expressão para a condição de contorno LL:

$$\omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{E_B I_B}{\rho_B L^4}}, \quad (17)$$

onde n representa os modos de vibração da viga.

Para a condição de contorno FL o deslocamento e a declividade na extremidade fixa nulos. Já na extremidade livre o momento fletor e a força cortante são nulos. Matematicamente estas condições são dadas por:

$$\frac{\partial y(x)}{\partial x} = 0 \Big|_{x=0}, \quad (18a)$$

$$\frac{\partial^2 y(x)}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 y(x)}{\partial x^3} \Big|_{x=L} = 0. \quad (18b)$$

Calculando a terceira derivada da Eq. (10) e aplicando o resultado à Eq. (18) obtém a seguinte expressão para ω_n da viga na condição de contorno FL:

$$\omega_n = (\lambda L)^2 \sqrt{\frac{E_B I_B}{\rho_B L^4}}. \quad (19)$$

Para o primeiro modo de vibração $\lambda = 1,8751$.

Finalmente, as equações (15), (17) e (19) podem ser usadas para calcular ω_n da viga compósita com fios de SMA embebidos, nas três condições de contorno consideradas e para qualquer número de fios de SMA. Na próxima seção serão apresentados os resultados obtidos para a variação da frequência natural em função da fração volumétrica de SMA.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da frequência natural ω_n foi realizada com os fios de SMA em duas situações extremas: a uma temperatura inferior à temperatura final de formação da martensita (M_f), ou seja, na fase martensítica, e a uma temperatura superior à temperatura final de formação da austenita (A_f), ou seja, na fase austenítica. Para cada fase foram consideradas as três condições de contorno (FF, FL, LL) para a viga compósita com Epóxi/Fibra de vidro. Para cada um destes casos variou-se a fração volumétrica de fibra de vidro e de SMA. As dimensões da viga analisada são de 280x25x1,5mm. E o fio de SMA considerado é de NiTi com diâmetro de 0,5mm. A Tabela 1 apresenta as propriedades termomecânicas dos fios de NiTi, e a Tabela 2 as propriedades dos materiais compósitos.

Tabela 1. Propriedades termomecânicas dos fios de NiTi (Lau, 2002).

Propriedade	Valor
Módulo elástico da martensita (E_m)	25 GPa
Módulo elástico da austenita (E_a)	50 GPa
Coefficiente de expansão térmica (Θ)	0.55 MPa/°C ⁻¹
Densidade (ρ)	6450 Kg/m ³
M_f	25°C
M_s	40°C
A_f	55°C
A_s	48°C

Tabela 2 – Propriedades da matriz compósita e da fibra de vidro (Mendonça, 2005).

Material	Propriedade	Valor
Epóxi	Módulo elástico	3 GPa
	Coefficiente de expansão térmica	1x10 ⁻⁶ °C ⁻¹
	Densidade	1200 Kg/m ³
Fibra de vidro	Módulo elástico	72 GPa
	Coefficiente de expansão térmica	5x10 ⁻⁶ °C ⁻¹
	Densidade	2500 Kg/m ³

As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 mostram o comportamento de ω_n em função da $f_{v_{SMA}}$ nas fases martensita, e austenita para $V_f = 10\%$ de fibra de vidro, carbono e kevlar sobre o compósito, respectivamente. Observa-se na Figura 5.4 que ω_n da viga SMAHC diminui em até 16,5% na fase martensita e aumenta em até 18,1% na austenita em função da $f_{v_{SMA}}$. Isso se justifica pelo fato do módulo elástico da SMA ser maior na fase austenita, Tabela 5.1. Baseado na Equação (4.61), a contribuição da densidade da viga SMAHC na fase martensita supera a do módulo elástico o que não ocorre na fase austenita. Entre as fases martensita e austenita percebe-se uma variação máxima de ω_n de 41,5% para todos os casos analisados.

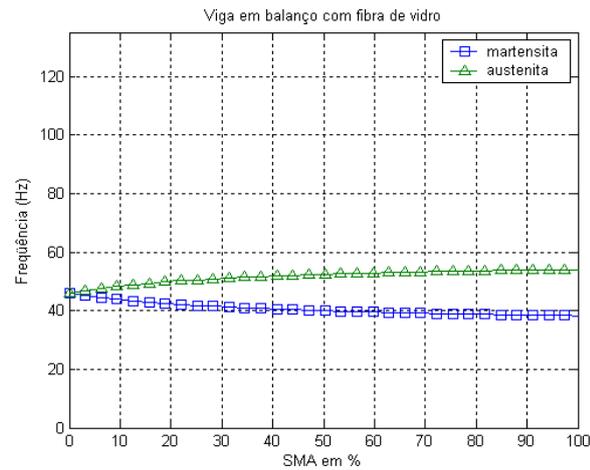


Figura 5.4 – Comportamento de ω_n para 10% de reforço de fibra de vidro no compósito.

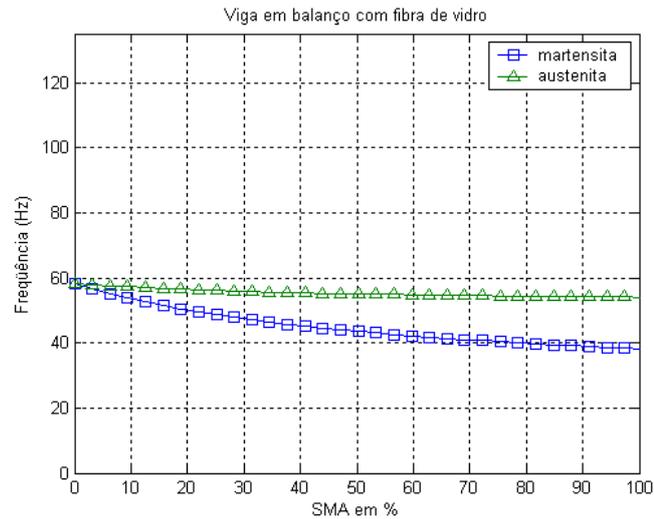


Figura 5.8 – Comportamento de ω_n para 20% de reforço de fibra de vidro no compósito.

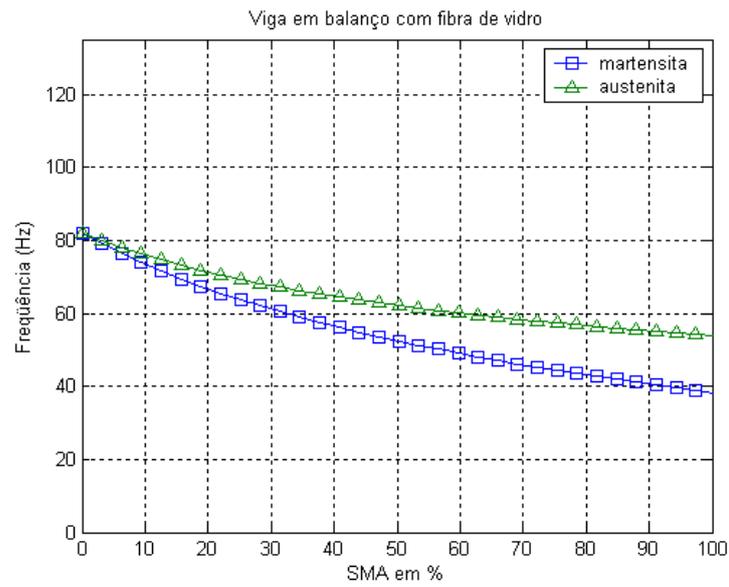


Figura 5.12 – Comportamento de ω_n para 50% de reforço de fibra de vidro no compósito.

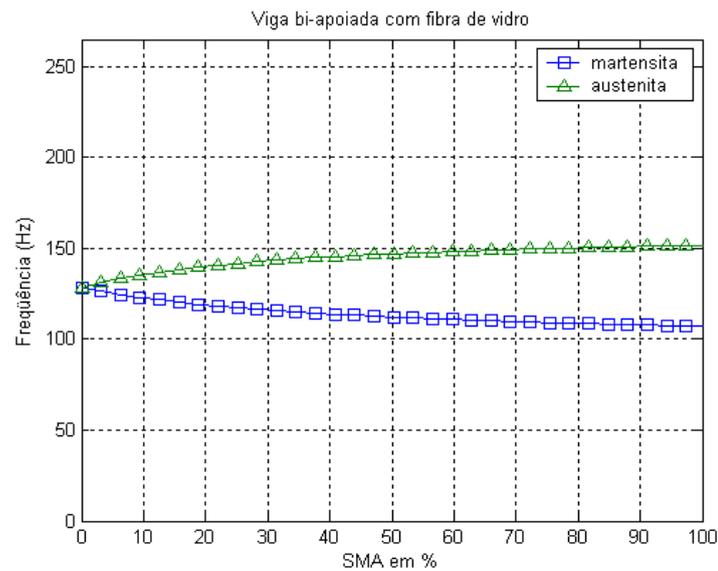


Figura 5.15 – Comportamento de ω_n para 10% de reforço de fibra de vidro no compósito.

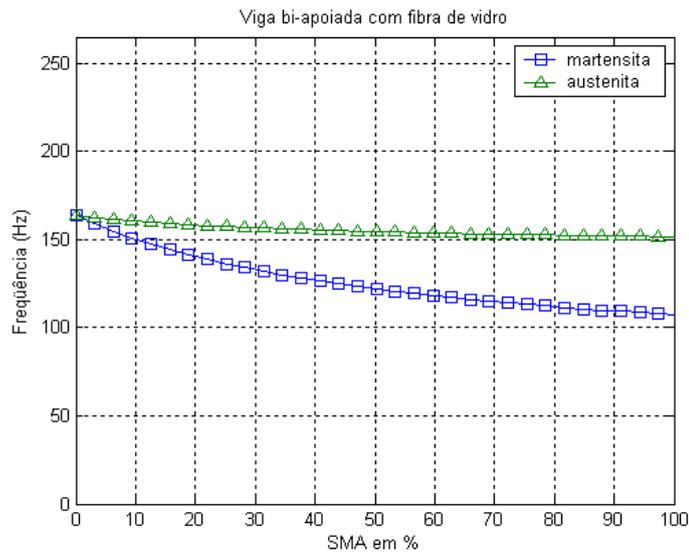


Figura 5.19 – Comportamento de ω_n para 20% de reforço de fibra de vidro no compósito.

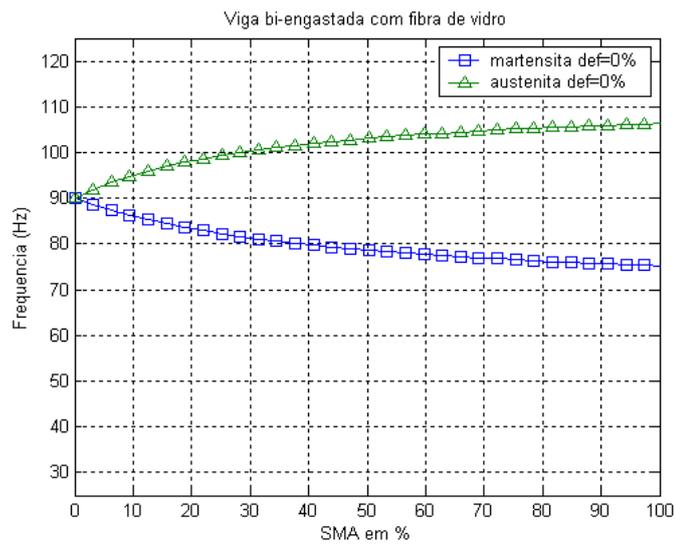


Figura 5.27 – Comportamento de ω_n para 10% de reforço de fibra de vidro no compósito.

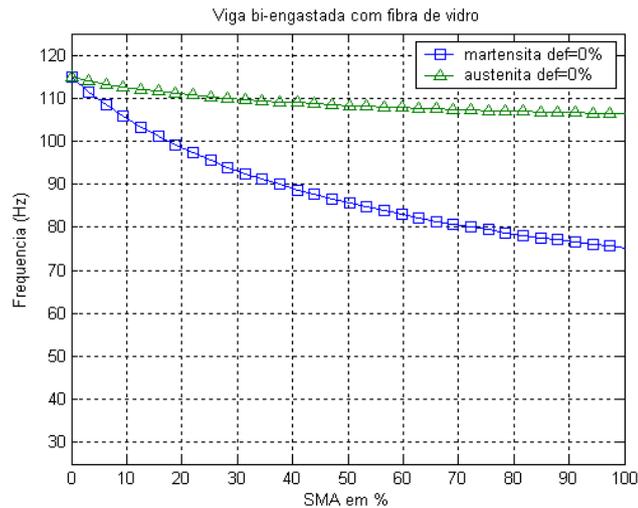


Figura 5.27 – Comportamento de ω_n para 20% de reforço de fibra de vidro no compósito.

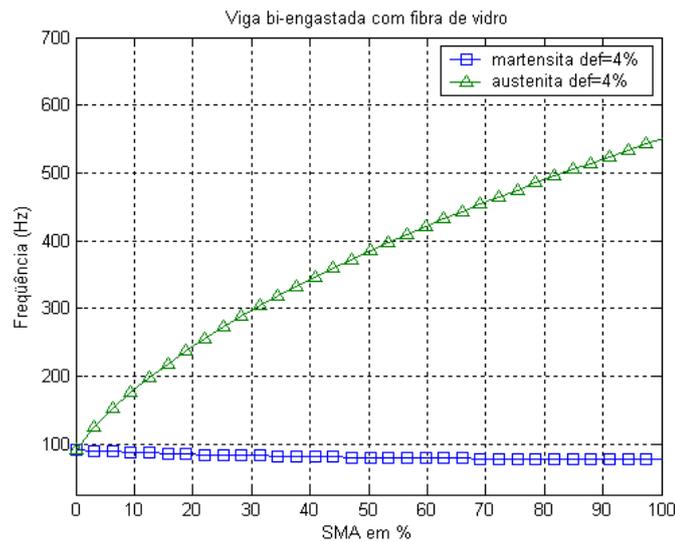


Figura 5.30 – Comportamento de ω_n para 10% de reforço de fibra de vidro no compósito.

A Figura (2) apresenta a evolução de ω_n em função do número de fios, para cada um das condições de contorno da viga compósito Epóxi/Fibra de vidro. Na fase martensítica (Figura 2a) nota-se que ω_n sofre uma pequena redução para todas as condições de contorno. Isso se explica pelo aumento da densidade da viga devido ao aumento do número de fios, uma vez que a densidade do fio de SMA é muito maior que a densidade da viga compósito Epóxi/Fibra de vidro. Quanto maior o número de fios maior é o denominador na raiz das equações (15), (17) e (19), e conseqüentemente menor será ω_n . Este comportamento não é observado na fase austenítica (Figura 2b), onde se observa um ligeiro aumento de ω_n com o número de fios para as condições FF (0%), FL e LL. Este comportamento pode ser explicado pelo aumento do

módulo elástico da viga, em função dos fios de SMA estarem agora na fase austenítica, e possuírem aqui um módulo elástico bem maior, Tabela 1. A contribuição desse aumento do módulo elástico da viga sobrepõe ao aumento da densidade com o aumento do número de fios de SMA. Na condição FF (4%) observa-se um aumento bem mais acentuado de ω_n com o número de fios. Este comportamento é explicado pelo aumento da tensão trativa atuante no material devido à força de recuperação dos fios de SMA geradas com o aquecimento.

A Figura (3) apresenta a evolução de ω_n em função do número de fios, para cada um das condições de contorno da viga compósita Epóxi/Fibra de carbono. Na fase martensítica (Figura 3a) observa-se um comportamento similar àquele observado para a viga compósita Epóxi/Fibra de vidro, e a interpretação do comportamento observado é a mesma. Já para a fase austenítica (Figura 3b) observa-se um comportamento oposto àquele observado como viga compósita Epóxi/Fibra de vidro, ou seja, ω_n decresce com o aumento do número de fios de SMA para as condições de contorno FF (0%), FL e LL. Este comportamento pode ser explicado pelo fato do módulo elástico do Epóxi/Fibra de carbono ser muito superior ao dos fios de SMA. Para a condição FF (4%) percebe-se que ω_n se manteve praticamente constante, com um ligeiro acréscimo com o aumento do número de fios. Neste caso, a tensão atuante na viga devido à força de recuperação suaviza a influência do módulo elástico da viga. Para a viga compósita Epóxi/Fibra de kevlar observa-se um comportamento similar, Figura (4). Observa-se uma pequena redução na frequência natural inicial, que é explicado pelo fato de o módulo elástico da viga Epóxi/kevlar ser menor que o da viga Epóxi/carbono, Tabela 2.

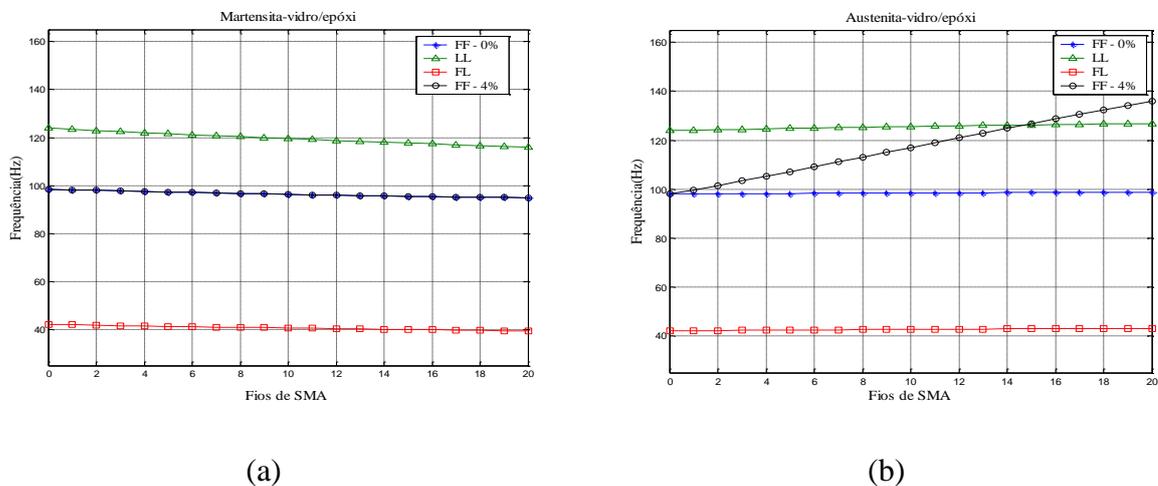
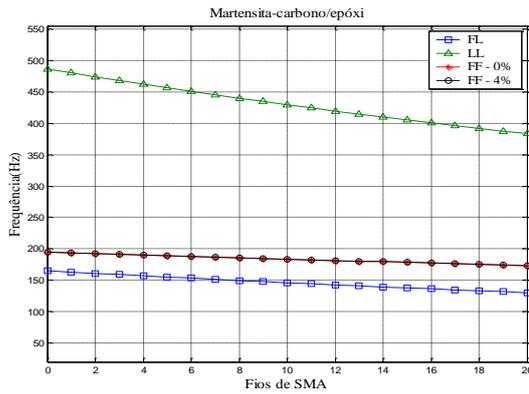
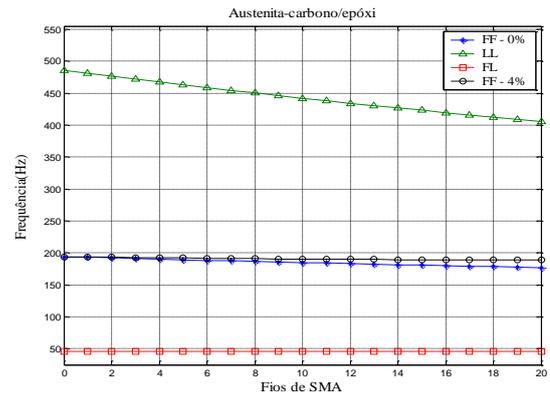


Figura 2. ω_n em função de n para Epóxi/Fibra de vidro sob as diferentes condições de contorno. a) Na fase martensita. b) Fase austenítica.

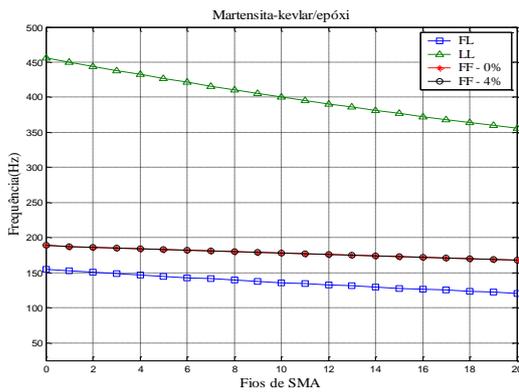


(a)

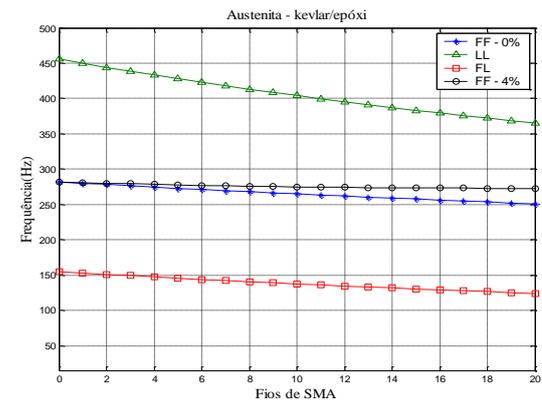


(b)

Figura 3. ω_n em função de n para o compósito Epóxi/Fibra de carbono sob as diferentes condições de contorno. a) Na fase martensita. b) Na fase austenítica.



(a)



(b)

Figura 4. ω_n em função de n para Epóxi/Fibra de kevlar sob as diferentes condições de contorno. a) Na fase martensita. b) Na fase austenítica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e às Centrais Elétricas do Norte (Eletronorte) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BAZ, A., Poh, S., Gilheany, J., 1993, “A multi-mode distributed sensor for vibrating beams”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 165:3, pp. 481-495.
- BRINSON, L. C., 1993, “One-Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation with Non-Constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 4, pp. 229-242.
- CHANDRA R., 2001, “Active shape control of composite blades using shape memory actuation”, *Smar Mater Struct*, Vol. 10, pp.1018 – 1024.
- CHOI, S.B., Hwang, J. H., 2000, “Structural vibration control using shape memory actuators”, *Journal of Sound and Vibration*, v.231, n,4, pp. 1168-1174.
- DA SILVA, E. P., Mesquita, A. L. A. 2000, “Aplicação de Ligas com Memória de Forma para controle de vibração em uma viga flexível”, *Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. Natal, RN, CD-ROM.
- GANDHI, M. V., Thonson, B. S., 1994, “Smart Materials and Structures”, Ed. Chapman & Hall, London, 309p.
- GOTTHARDT, R., Bidaux, J. R., 1998, "Functional Materials Based On Polymer Matrix Composites With Embedded Shape Memory Alloy Fibers", TMS Publications, pp. 157-166.
- Janoch, H., 1999, “Adaptronic and Smart Structures - Basics, Material, Design and Applications”, Ed. Springer-Verlag, Berlin, 438p.
- JIA, J., Rogers, C. A., 1989, “Formulation of a mechanical model for composites with embedded SMA actuators”, *Failure prevention and reliability - Proceedings of the Eighth Biennial Conference*, Montreal, Canada, pp. 203-210.
- Lau, K., Zhon, L., Tao, X., 2002, “Control of natural frequencies of a clamped clamped composite beam with embedded shape memory alloy wires”, *Composite Structures*, Vol. 58, pp. 39-47.
- LAU, K., 2002, “Vibration characteristics of SMA composite beams with different boundary conditions”, *Materials & Design*, Vol. 23, pp. 741-749.
- LIANG C, Rogers C.A., 1997, “One dimensional thermo-mechanical constitutive relations for shape memory materials”, *J Int Mater Sys Struct*, Vol. 8, pp. 285–302.
- Mendonça, P. T. R., 2005, “Materiais Compostos & Estruturas-Sanduiche: Projeto e Análise”, Ed. Manole, Barueri, São Paulo, Brasil, 586p.

- NAGAYA, K., Takeda, S., Tsukui, Y., Kumaido, T., 1987, “Active control method for passing through critical speeds of rotating shafts by changing stiffness of the supports with use of memory materials”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 113(2), pp. 307-315.
- Oh, J. T., Park, H. C., Hwang, W., 2001, “Active shape control of a double-plate structures using piezoceramics and SMA wires, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 10, pp. 1100-1106
- Saadat, S., Noori, M., Davoodi, H., Suzuki, Y., Masuda, A., 2001, “Using NiTi SMA tendons for vibration control of coastal structures’, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 10, pp. 695-704.
- SANDERS, B., Cowan, D., Scherer, L., 2004, “Aerodynamic Performance of the Smart Wing Control Effectors”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 15, No. 4, pp.293-303.
- SHAHIN, A.R., Meckl, P. H., Jones, J. D., 1997, "Modeling of SMA tendons for active control of structures", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 8, No. 1, pp. 51-70.
- SRINIVASAN, A. V., Mc Farland, D. M., 2001, “Smart Structures, Analysis and Design”, Ed. Cambridge University Press, 228p.
- ZAK, A.J., Cartmell, M. P., Ostachowicz, W. M., 2003, “Dynamics and control of a rotor using an integrated SMA/Composite active bearing actuator”, *Key Engineering Materials*, Vols. 245-246, pp. 233-240.
- WILLIAMS, K., Chiu, G., Bernhard, R., 2002, “Adaptive-passive absorbers using shape-memory alloys”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 249, No. 5, pp. 835-848.

DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos neste trabalho.