



VIGA ATIVA USANDO ATUADORES E SENSORES PIEZELÉTRICOS INCORPORADOS

José Juliano de Lima Jr.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Depto de Engenharia Mecânica.

Cx. P. 50 – 37500-000 – Itajubá, MG, Brasil.

e-mail: juliano@iem.efei.br

José Roberto de França Arruda

Universidade Estadual de Campinas, Depto de Mecânica Computacional.

Cx. P. 6122 – 13083-970 – Campinas, SP, Brasil.

e-mail: arruda@fem.unicamp.br

Resumo. *As possibilidades de controle passivo de vibrações estão praticamente esgotadas e a melhoria no desempenho de novos equipamentos, nas áreas veicular, aeronáutica e espacial, dependem hoje, em grande parte, do controle ativo de vibrações e ruídos. Um dos materiais mais empregados, nesse tipo de controle, são os materiais piezelétricos. Nesse novo enfoque, a obtenção de modelos que permitam analisar, de forma detalha e precisa o comportamento estático e dinâmico de estruturas com elementos piezelétricos incorporados é de fundamental importância no desenvolvimento dessa tecnologia. Nossos objetivos são apresentar uma metodologia para modelagem de estruturas do tipo viga, com elementos piezelétricos incorporados modelados via M.E.F. e implementar a simulação numérica e experimental do controle ativo de vibrações, usando esse modelo. Ensaios foram realizados com os objetivos de identificar um modelo de estados da estrutura e validar o modelo numérico obtido.*

Palavras-chave: *Estruturas Inteligentes, Piezoeletricidade, Elementos Finitos, Vigas*

1 INTRODUÇÃO

Recentemente, um novo enfoque no controle de vibrações em estruturas flexíveis tem sido alvo de estudos de vários pesquisadores. Segundo esse enfoque, uma estrutura pode ter a sua resposta minimizada, utilizando de forma integrada elementos ativos, como sensores e atuadores, e controladores. Conseqüentemente, essa integração capacitaria o sistema a responder de modo controlado à excitações externas, procurando compensar os efeitos, que levariam sua resposta a se afastar de patamares aceitáveis. Hoje, esses sistemas, integrando estrutura, sensores, atuadores e controladores, são conhecidos como *Estruturas Inteligentes*.

Várias tecnologias e materiais têm sido investigados e propostos no desenvolvimento dessas estruturas. Uma das mais populares, consiste em usar materiais que exibem

propriedades piezelétricas, especialmente as cerâmicas, *PZT (Titanato Zirconato de Chumbo)*, e os filmes plásticos, *PVDF (Fluorido de Polivinilideno)*.

Descobertos por *Jaffet et al.* em 1954 (*Clark, Saunders & Gibbs, 1998*), os PZTs são constituídos principalmente de óxido de chumbo, zircônio e titânio, e, na sua fabricação, é aplicado um grande campo de coerção, que polariza a cerâmica, alinhando suas moléculas polarizadas na direção do campo elétrico, propiciando, assim, as desejadas propriedades piezelétricas. Uma das vantagens do PZT reside no fato de apresentar grande rigidez, da ordem de 70 GPa, sendo idealmente indicados na confecção de atuadores.

Já o PVDF, cujas propriedades piezelétricas foram descobertas por *Kawai* após 1960 (*Tseng, 1989*), é um polímero piezelétrico robusto e maleável, que pode ser produzido em geometrias complexas e extremamente delgadas, por causa da sua constante piezelétrica. Com todas essas propriedades, o PVDF é altamente indicado para sensoriamento distribuído.

Esses materiais piezelétricos apresentam o fenômeno da piezoelectricidade, isto é, desenvolvem um campo elétrico, quando sujeitos a uma força (ou pressão), *efeito piezelétrico direto*, e, inversamente, apresentam uma deformação, quando sujeitos a um campo elétrico, *efeito piezelétrico inverso*. Esta reciprocidade entre a energia mecânica e elétrica propicia aos materiais piezelétricos grande aplicabilidade em várias áreas.

1.1 Breve histórico

Curiosamente, embora a piezoelectricidade tenha uma longa história, visto que o efeito direto da piezoelectricidade foi descoberto pelos irmãos *Curie & Curie*, em 1880, e o efeito inverso da piezoelectricidade foi teoricamente previsto por *Lippman*, com base em princípios termodinâmicos (*Rao & Sunar, 1994*), seu uso em aplicações de controle é relativamente recente, *Bailey & Hubbard (1985)*, *Crawley & de Luis (1987)*, *Gibbs & Fuller (1992)*, *Tseng & Tzou (1993)*, *Chandrashekhara et al (1996)* e *Moreira (1998)*. Uma explicação para esse fato seria a espera pela síntese e o desenvolvimento de novos materiais piezelétricos, que pudessem ser aplicados para essa finalidade. Relatos sobre estes desenvolvimentos, bem como sobre a base teórica do fenômeno da piezoelectricidade, podem ser encontrados em *Cady (1946)*.

Um dos primeiros trabalhos, apresentando o uso de atuadores piezelétricos como elementos de estruturas inteligentes, foi apresentado por *Crawley & de Luis (1987)*. Estes construíram três protótipos de estruturas inteligentes, a saber: uma viga de alumínio com atuadores piezelétricos colados sobre suas superfícies, uma viga de grafita/epoxy e outra com fibra de vidro/epoxy, ambas com material piezelétrico imerso nessas estruturas.

Um dos primeiros trabalhos, empregando o M.E.F. (método dos elementos finitos), foi apresentado por *Allik & Hughes (1970)*, que propuseram um método geral de análise estática e dinâmica de estruturas piezelétricas. *Naillon et al. (1983)* simularam, através de um modelo numérico obtido via M.E.F, o fenômeno de ressonância em transdutores ultra-sônicos. *Tseng (1989)* empregou o elemento hexaedro isoparamétrico não conforme de oito nós. *Há, Keilers & Chang (1992)* aplicaram o elemento trilinear em materiais composto. *Lima Jr. & Arruda (1997)* desenvolveram um programa para a aplicação do elemento trilinear de oito nós em estruturas com elementos piezelétricos incorporados.

1.2 Proposta do trabalho

Neste trabalho, uma metodologia é aplicada ao estudo de estruturas com atuadores e sensores piezelétricos incorporados. Os modelos, analítico e numérico, obtidos permitem analisar o comportamento estático e dinâmico dessas estruturas. É desenvolvido um modelo

para estruturas com comportamento de viga de Euler–Bernoulli. Um programa foi desenvolvido, trabalhando com elementos finitos, para análise dessas estruturas. Finalmente, para uma estrutura com atuadores e sensores incorporados, foram realizados ensaios, empregados as técnicas de modelagem propostas e controle ativo. Os resultados experimentais validaram o modelo numérico desenvolvido.

2 MODELAGEM DE VIGA PARA MATERIAIS PIEZOCERÂMICOS

A equação do movimento transversal de estruturas com características de vigas é deduzidas a partir do equacionamento geral de casca (Novozhilov, 1970). Em seguida, os efeitos do atuador piezolétrico são introduzidos no modelo de viga (Banks & Wang, 1995).

Baseado nos Postulados de Love, escolha apropriada dos parâmetros de Lamé e dos raios de curvatura, podemos obter a equação de viga de Euler-Bernoulli.

$$\rho hb \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + YI \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = bF_z + b \frac{\partial m_x}{\partial y} \quad (1)$$

onde: ρ é a densidade do material (kg/m^3), Y o módulo de Young (GPa), h a espessura (m), b a largura (m), I o momento de inércia (m^4), F_z a força (N), m_x o momento (Nm/m) e w o deslocamento na direção transversal (m).

2.1 Equação do atuador

Vamos considerar que duas camadas finas, axialmente orientadas na direção y , de uma material piezolétrico, são respectivamente coladas na parte superior e inferior da uma viga elástica. Uma das camadas atua como atuador e a outra como sensor.

A contribuição da cerâmica piezolétrica pode ser dividida em duas categorias, chamada interna (material) e externas (forças e momentos). As forças e momentos internos levam em consideração as mudanças nas propriedades do material da estrutura, como massa, rigidez e amortecimento, devido à presença da cerâmica, e está presente, mesmo quando não existe potencial elétrico aplicado sobre a cerâmica. A contribuição externa é devida à deformação induzida pela cerâmica, quando aplicamos um potencial elétrico, e aparece nas equações de movimento como carga externa (Tzou & Fu, 1994; Banks & Wang, 1995).

A amplitude da deformação livre induzida no PZT é:

$$\varepsilon_{pe} = (\varepsilon_y)_{pe} = \frac{d_{31}}{h^a} \phi^a \quad (2)$$

onde: ε_{pe} é a deformação induzida (1), d_{31} a constante piezolétrica (m/V) e ϕ^a o potencial elétrico aplicado no atuador (V).

A tensão individual, σ_y (GPa), no PZT é determinada por:

$$(\sigma_y)_{pe} = -Y_{pe} \varepsilon_{pe} = -Y_{pe} \frac{d_{31}}{h^a} \phi^a \quad (3)$$

Integrando a tensão sobre a face do elemento, as forças e os momentos externos resultantes, devido à ativação individual do PZT, podem ser expressos como:

$$(bN_y)_{pe} = -Y_{pe}bh_{pe}\varepsilon_{pe} = -Y_{pe}bd_{31}\phi^a \quad (4)$$

$$(bM_y)_{pe} = -\frac{1}{8}Y_{pe}b\left[4\left(\frac{h}{2} + h^a\right)^2 - h^2\right]\varepsilon_{pe} = -\frac{1}{2}Y_{pe}b(h + h^a)d_{31}\phi^a \quad (5)$$

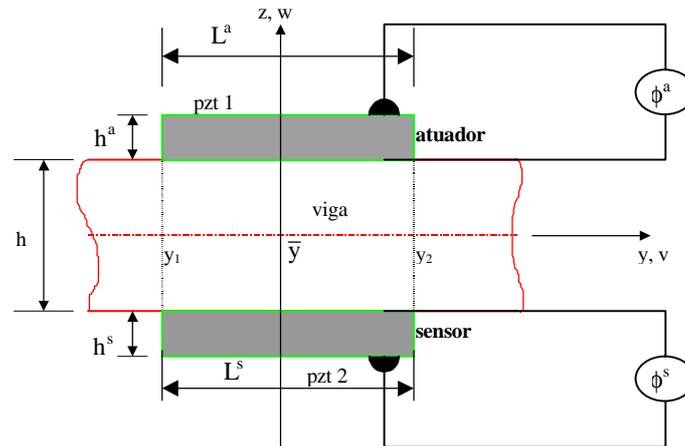


Figura 1 – Atuador e Sensor de PZT Colados sobre uma Viga.

No desenvolvimento da força externa e momento resultante, devido à ativação do PZT, efeitos de borda foram ignorados e, portanto, as expressões (4) a (5) aplicam-se ao PZT, cobrindo toda a viga. Essas equações podem ser modificadas para PZT finito da seguinte maneira. Para o PZT, com comprimento y_1 e y_2 , as forças e os momentos totais são:

$$bF_y = (bF_y)_{pe} = -\psi_{pe}(y)\chi_{pe}(y)\frac{\partial(bN_y)_{pe}}{\partial y} \quad (6)$$

$$bm_x = (bm_x)_{pe} = \chi_{pe}(y)\frac{\partial(bM_y)_{pe}}{\partial y} \quad (7)$$

com:

$$\chi_{pe}(y) = \begin{cases} 1 & y_1 \leq y \leq y_2 \\ 0 & \text{de outra forma} \end{cases} \quad \text{e} \quad \psi_{pe} = \begin{cases} 1 & y < (y_1 + y_2)/2 \\ 0 & y = (y_1 + y_2)/2 \\ 1 & y > (y_1 + y_2)/2 \end{cases} \quad (8)$$

2.2 Equação do sensor

A equação do sensor piezelétrico é obtida com base no efeito direto da piezeletricidade e na relação entre tensão e deformação da viga. Assumimos que a espessura do sensor é pequena quando comparada com a espessura da estrutura. Assim, a deformação do sensor piezelétrico é considerada constante e igual a deformação a superfície da estrutura.

A voltagem através dos eletrodo pode ser obtida integrando o campo elétrico através da espessura do sensor piezelétrico, isto é:

$$\phi = - \int_{h^s} E_3 dz = h^s (h_{31} \varepsilon_y^s + \beta_{33} D_3) \quad (9)$$

onde β_{33} é a impermeabilidade elétrica (m/F).

Rearranjando a Eq. (9), podemos escrever o deslocamento elétrico do sensor como:

$$D_3^s = \frac{1}{\beta_{33}} \left(h_{31} \varepsilon_y^s - \frac{\phi}{h^s} \right) \quad (10)$$

Como D_3^s é definido como a carga por unidade de área, uma vez integrando a Eq. (10) sobre a superfície do eletrodo S^e , estimamos a carga de superfície total. A condição de circuito aberto da voltagem ϕ^s pode ser obtida fazendo a carga igual a zero, isto é:

$$\phi^s = \frac{h^s}{S^e} \int_{S^e} (h_{31} \varepsilon_y^s) dS^e = \frac{h^s}{y_2 - y_1} \int_y (h_{31} \varepsilon_y^s) dy \quad (11)$$

Assim, a equação do sensor para uma Viga de Euler – Bernoulli pode ser reduzida a:

$$\phi^s = - \frac{h^s}{L^s} \int_{y_1}^{y_2} \left(h_{31} h_r^s \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) dy \quad (12)$$

onde: h_r^s é a distância entre a linha neutra da viga até o plano médio do sensor (m) e h_{31} é a constante que relaciona a voltagem de circuito aberto a uma dada tensão (C/Fm).

Como pode ser observado na Eq. (12), a integração depende das condições de contorno e da área efetiva da camada do sensor piezelétrico. Ela mostra que o sinal de saída do sensor é proporcional a inclinação das extremidades do sensor. Conseqüentemente o sinal do sensor é igual a zero se a inclinação na extremidade $y = y_1$ for igual a inclinação na extremidade oposta $y = y_2$. Esse e o caso dos modos anti-simétricos de uma viga simplesmente apoiada com uma camada de sensor piezelétrico simetricamente distribuído.

3 FORMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

As equações da piezoeletricidade são complexas e impedem soluções fechadas para geometrias complexas. Nesse sentido, o m.e.f se mostra atrativo e é uma importante ferramenta, freqüentemente, indispensável na análise e projeto de engenharia (Bathe, 1996).

A equação do *Princípio Variacional Eletromecânico para Meios Piezelétricos* pode ser escrita como (Lima Jr, 1999):

$$\begin{aligned}
& \iiint_V \rho \{\delta u\}^T \{\ddot{u}\} dV + \iiint_V \{\delta \varepsilon\}^T [c^E] \{\varepsilon\} dV - \iiint_V \{\delta \varepsilon\}^T [e]^T \{E\} dV - \iiint_V \{\delta E\}^T [e] \{\varepsilon\} dV \\
& - \iiint_V \{\delta E\}^T [\xi] \{E\} dV = \iiint_V \{\delta u\}^T \{\bar{f}_v\} dV + \iint_{S_f} \{\delta u\}^T \{\bar{f}_s\} dS - \iint_{S_q} \delta \phi \sigma_q dS
\end{aligned} \tag{13}$$

3.1 Sistema Global de Equações

Trabalhando a equação do princípio variacional eletromecânico, Eq. (13), com a discretização proposta e montando as matrizes globais, escrevemos o sistema global de equações de movimento para um modelo de viga de Euler – Bernoulli com atuadores e sensores incorporados

$$\begin{cases} [M_{qq}] \{\ddot{q}_i\} + [K_{qq}] \{q_i\} + [K_{q\phi}] \{\phi_i\} = \{F_s\} \\ [K_{\phi q}] \{q_i\} + [K_{\phi\phi}] \{\phi_i\} = \{Q_s\} \end{cases} \tag{14}$$

onde:

$$[M_{qq}] = (\rho_{st} A_{st} + \rho_{pe} A_{pe}) L \int_0^1 [N_q]^T [N_q] d\xi \tag{15}$$

$$[K_{qq}] = \iiint_{V_{pe}} ([B_u] - z[B'_w])^T E_{pe} ([B_u] - z[B'_w]) dV_{pe} \tag{16}$$

$$[K_{q\phi}] = \iiint_{V_{pe}} ([B_u] - z[B'_w])^T e_{31} [B_\phi] dV_{pe} \tag{17}$$

$$[K_{\phi q}] = \iiint_{V_{pe}} [B_\phi]^T e_{31} ([B_u] - z[B'_w]) dV_{pe} \tag{18}$$

$$[K_{\phi\phi}] = - \iiint_{V_{pe}} [B_\phi]^T \xi_{33}^\varepsilon [B_\phi] dV_{pe} \tag{19}$$

$$\{F_s\} = \int_0^1 [N_w]^T \{\bar{f}_s\} L d\xi \tag{20}$$

$$\{Q_s\} = - \int_0^1 [N_\phi]^T \sigma_q L d\xi \tag{21}$$

onde: $[M_{qq}]$ é a matriz massa (kg); $[K_{qq}]$ a matriz de rigidez estrutural (N/m); $[K_{q\phi}]$ matriz de rigidez piezoeletrica (N/V); $[K_{\phi q}]$ a matriz de rigidez dielétrica (F); $\{F_s\}$ o vetor força de superfície (N) e $\{Q_s\}$ vetor carga elétrica de superfície (Q).

3.2 Equações do Sensor e Atuador Piezoeletrico

Tomando o valor do potencial elétrico na segunda equação do sistema de Eqs. (14), temos:

$$\{\phi\} = [K_{\phi\phi}]^{-1} (\{Q_s\} - [K_{\phi q}]\{q\}) \quad (22)$$

Como no sensor não existe potencial elétrico aplicado, a equação do sensor pode ser escrita como:

$$\{\phi\} = -[K_{\phi\phi}]^{-1} [K_{\phi q}]\{q\} \quad (23)$$

Substituindo a Eq. (22) na primeira equação do sistema de Eqs. (14), obtemos a equação do atuador.

$$[M_{qq}]\{\ddot{q}\} + [K^+]\{q\} = \{F_q\} + \{F_{el}\} \quad (24)$$

onde:

$$[K^+] = [K_{qq}] - [K_{q\phi}][K_{\phi\phi}]^{-1}[K_{\phi q}] \quad (25)$$

$$\{f_{el}\} = -[K_{q\phi}][K_{\phi\phi}]^{-1}\{Q_s\} \quad (26)$$

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

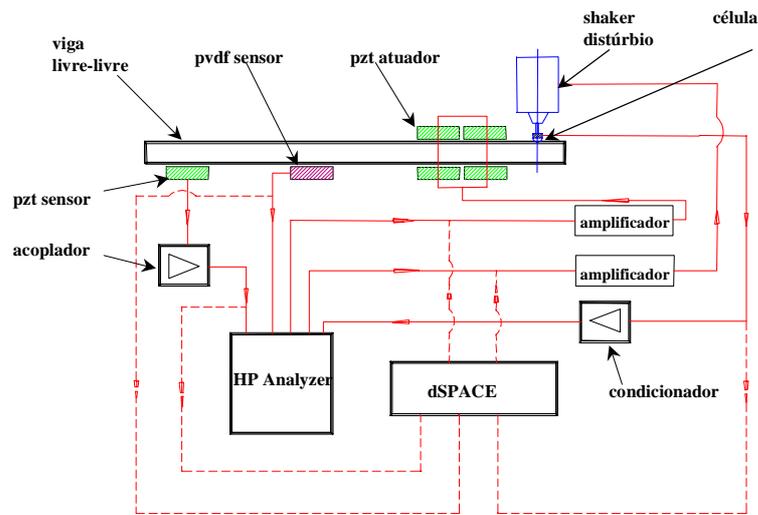


Figura 2 – Esquema da Montagem Utilizada nos Ensaios.

Uma estrutura do tipo viga é suspensa com auxílio de elementos flexíveis. A condição de contorno pretendida é a livre – livre. A viga é instrumentada com sensores de PZT e de PVDF. O atuador de controle consiste de um conjunto de cerâmicas piezelétricas. A estrutura é excitada através de um atuador de distúrbio, que consiste em um excitador eletrodinâmico (“shaker”), com um transdutor de força acoplado na sua extremidade. Ainda fazem parte da instrumentação, circuitos eletrônicos de amplificação, acopladores de impedância para o sensor de PZT e transdutor de força, sistema de aquisição de dados HP35650 com software HP3566A (HP Analyzer), um microcomputador que executa o programa de controle em tempo real, equipado com placa de conversão analógico/digital DS2103, digital/analógico DS2003 e com processador digital de sinais DS1003 (dSPACE GmbH).

4.1 Modelo via m.e.f.

A estrutura ensaiada foi modelada com 50 elementos de viga de Euler – Bernoulli, resultando em um modelo com 51 nós e 102 gdl. Esse foi ajustado usando o Método de Ajuste de Modelos das Variáveis Instrumentais (FRISWELL & MOTTERSHEAD, 1995).

O primeiro gráfico da Figura 3 apresenta uma comparação entre as FRF experimental e a obtida através do método dos elementos finitos, e no segundo são apresentados os valores dos desvios relativos percentuais entre os modelos de estado identificado e M.E.F.

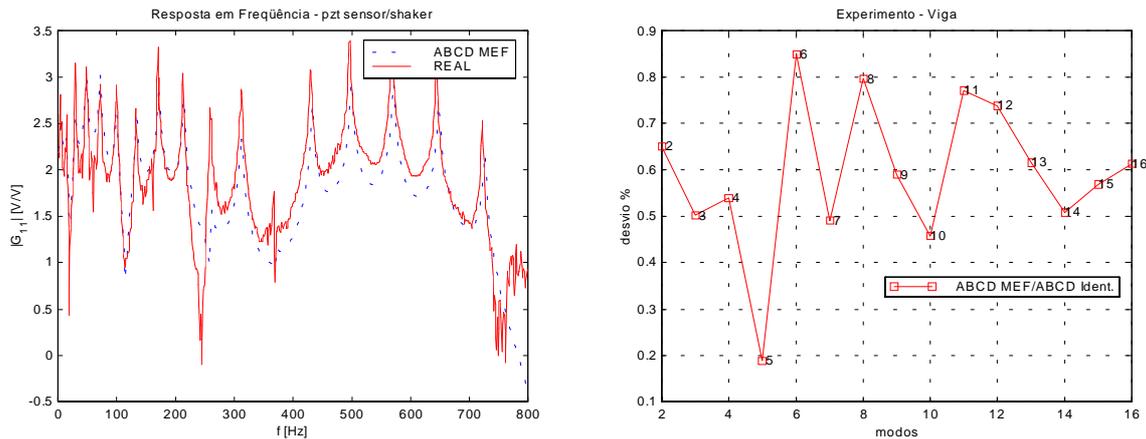


Figura 3 – Comparação entre a FRF Experimental e a Gerada com o Modelo MEF – G_{11}

4.2 Controle ativo da estrutura

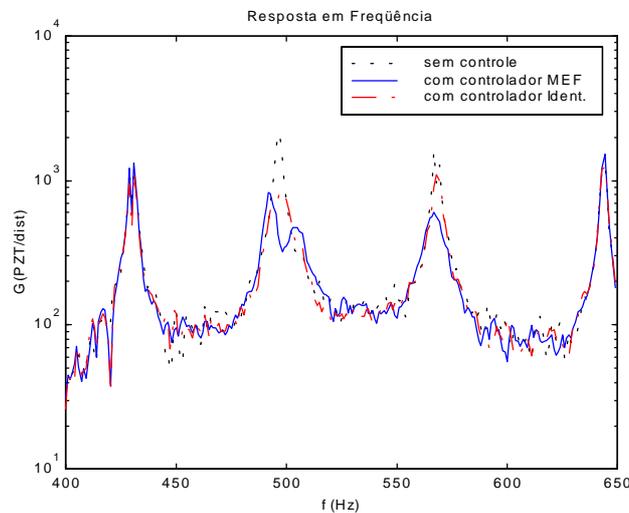


Figura 4 – Comparação entre o Controlador MEF e Identificado – Zoom

O controlador empregado é do tipo robusto H_{∞} de banda limitada, com modelo de incerteza não estruturada aditiva para a incerteza residual e com incerteza paramétrica na faixa de frequência controlada (Moreira, 1998).

Nesse experimento, a viga é excitada por um sinal de distúrbio externo. A resposta do sistema é medida pelo sensor de PZT, e o sinal de distúrbio é medido pelo transdutor de força. O controlador digital, executado nas placa DSP, lê o sinal do sensor de PZT e gera o sinal de controle, que realimenta o sistema. O controlador contínuo é discretizado com um tempo de amostragem de 70 μ s, e é implementado no ambiente SIMULINK / dSPACE.

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos no ensaio de controle ora usando a dinâmica identificada, ora usando o modelo M.E.F. no projeto do controlador. Esses resultados atestam que a viga teve a sua resposta minimizada pelos dois controladores, com um melhor desempenho para controlador sintetizado com o modelo de elementos finitos. Esse fato atesta a validade do modelo empregado e indica a possibilidade do emprego, no projeto do controlador, do modelo teórico

5 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Foi apresentada uma metodologia, pela qual a interação entre a estrutura e o elemento piezelétrico é modelada. Com esse modelo, obtivemos a equação de movimento de viga, Euler–Bernoulli, a partir das equações de casca, com base nos postulados de Love, na escolha apropriada dos raios de curvatura e nos parâmetros de Lamé.

O modelo, obtidos via elementos finitos, apresentou resultados compatíveis com os modelos identificados, principalmente nas frequências de controle. Analisando a Figura 3, observamos que houve uma excelente concordância entre as frequências naturais dos modelos, identificado e MEF.

O controle ativo da viga foi implementado, ora usando o controlador projetado com a dinâmica identificada, ora projetado com o modelo de elementos finitos. Observamos, pela Figura 4, que a estrutura teve a sua resposta minimizada pelos dois controladores propostos. Entretanto, o desempenho do controlador MEF foi superior. Esse fato, que precisa, ainda, ser melhor investigado, indica que o emprego, no projeto do controlador, do modelo teórico, pode ser benéfico, visto que este não apresenta ruídos externos, como os verificados no modelo identificado. Esses resultados comprovam a validade do modelo numérico empregado e a efetividade da técnica de controle.

6 REFERÊNCIAS

- Allik, H., Hughes, T. J. R. (1970), “Finite Element Method for Piezoelectric Vibration”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v 2, pp 151-157.
- Banks, H. T., Smith, R. C., Wang, Y. (1995), “The Modeling of Piezoceramic Patch Interactions with Shells, Plates, and Beams”, *Quarterly of Applied Mathematics*, v LIII, n 2, pp 353-381.
- Bailey, T., Hubbard Jr. J. E. (1985), “Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam”, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, v 8, n 5, pp 605-611.
- Bathe, K.-J. (1996), *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1051p.
- Cady, W. G. (1946), *PIEZOELECTRICITY - An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals*, McGraw-Hill, 806p.
- Chandrashekhara, K., Varadarajan, S., Agarwal, S. (1996), “Adaptive Shape Control of Laminated Composite Plates Using Piezoelectric Materials”, *Adaptive Structures Forum*, AIAA/ASME/AHS, CP-963, AIAA-96-1288-CP, pp 197-206.
- Clark, R. L., Saunders, W. R., Gibbs, G. P. (1998), *Adaptive Structures Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, New York, 467p.
- Crawley, E. F., de Luis, J. (1987), “Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures”, *AIAA Journal*, v 25, n 10, pp 1373-1385.
- Friswell, M. I., Mottershead, J. E. (1995), *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*, Kluwer Academic Publishers, London, 292p.

- Gibbs, G. P., Fuller, C. R. (1992), "Experiments on Active Control of Vibration Power Flow Using Piezoceramic Actuator/Sensors", *AIAA Journal*, v 30, n 2, pp 457-463.
- Ha, S. K., Keilers, C., Chang, F.-K. (1992), "Finite Element Analysis of Composite Structures Containing Distributed Piezoceramic Sensors and Actuators", *AIAA Journal*, v 30, n 3, pp 772-780.
- Lima Jr., J. J. de (1999), *Modelagem de Sensores e Atuadores Piezelétricos com Aplicações em Controle Ativo de Estruturas*, Tese de Doutorado, Depto. de Mecânica Computacional, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 243p.
- Lima Jr., J. J. de, Arruda, J. R. F. (1997), "Finite Element Modeling of Piezoceramic Sensors and Actuators", *Anais do XVIII CILAMCE*, Congresso Ibero Latino – Americano de Métodos Computacionais para Engenharia, Brasília, v 1, ref 198, pp 751-757.
- Moreira, F. J. O. (1998), *Um Controlador H^∞ de Banda Limitada para Controle Ativo de Vibração Estrutural*, Tese de Doutorado, Depto. de Mecânica Computacional, UNICAMP, 199p.
- Naillon, M., Coursant, R. H., Besnier, F. (1983), "Analysis of Piezoelectric Structures by a Finite Element Method", *ACTA Electronica*, v 25, n 4, pp 341-362.
- Novozhilov, V. V. (1970), *Thin Shell Theory*, trad. by. P. G. Lowe., 2nd ed., Groninger : Wolters-Noordhoff, 422p.
- Rao, S. S., Sunar, M. (1994), "Piezoelectricity and its Use in Disturbance Sensing and Control of Flexible Structures: A Survey", *Applied Mechanical Review*, v 47, n 4, pp 113-123.
- Tseng, C. I. (1989), *Electromechanical Dynamics of a Coupled Piezoelectric / Mechanical System Applied to Vibration Control and Distributed*, Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Kentucky, 240 p.
- Tseng, C. I., Tzou, H. S. (1993), "Distributed Observing and Active Control of a Cantilever Plate", *Intelligent Structures Materials and Vibrations*, v 58, pp 59-65.
- Tzou, H. S., Fu, H. Q. (1994), "A Study of Segmentation of Distributed Piezoelectric Sensors and Actuators, Part I: Theoretical Analysis", *Journal of Sound and Vibration*, v 172, n 2, pp 247-259.

ACTIVE BEAM WITH INCORPORATED PIEZOLECTRIC ACTUATORS AND SENSORS

Abstract. *There is practically no room for innovation on existing vibration passive control and nowadays the improvement in the acting of new equipment, such as, vehicular, aeronautics and space fields are largely dependent on the active control of vibrations and noises. One of the most popular materials, in that control type, are the piezoelectric materials. In that new focus, the development of the structures models, which allows to analyze, in details, the static and dynamic behavior of theses structures with piezoelectric elements incorporated on it. Therefore, the developed models are of fundamental importance in the development of that technology. Our objectives are to present the methodology of the modelling of structures of the beam type, with piezoelectric elements incorporated and modeled through F.E.M., and to implement the numeric and experimental simulation of the active control of vibrations. Experimental procedures are conducted to identify the states model of the structure and to validate the developed numerical model.*

Word-keys: *Intelligent structures, Piezoelectricity, Finite element method, Beams.*