



CONTROLE DE FORMA EM UMA ESTRUTURA ESPACIAL INTELIGENTE UTILIZANDO ELEMENTOS ATIVOS

LUCIANO BRITO RODRIGUES¹, JOSÉ FELÍCIO DA SILVA², VIRGÍLIO MENDONÇA COSTA E SILVA², JOSÉ ALBERTO ARAÚJO³

¹Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, DTRA.
Praça Primavera, 40, 45700-000, Itapetinga, Bahia, Brasil.

²Universidade Federal da Paraíba, DTM.
Campus I, João Pessoa, Paraíba, Brasil.

³Universidade Federal do Rio Grande do Norte, DEM.
Campus Universitário, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.

(Recibido 22 de abril de 2004, para publicación 31 de julio de 2007)

Resumen – O controle de vibração e de forma em estruturas, utilizando elementos ativos, tem crescido e vem sendo apontado como uma opção economicamente viável, principalmente devido à redução dos custos dos sensores, atuadores e circuitos para aquisição e geração de sinais. Diversos tipos de elementos ativos têm sido testados e utilizados, sendo que os elementos ativos feitos de materiais piezoelétricos (PZT), são os de maiores aplicações. Estes elementos são distribuídos ao longo da estrutura, trabalhando como elementos estruturais, sensores e atuadores. O correto posicionamento dos elementos ativos na estrutura é o que determina a eficiência do sistema de controle implantado. Este trabalho trata do posicionamento ótimo de elementos ativos para o controle de forma (quase-estático) de estruturas espaciais utilizando a técnica do Método Exaustivo com o critério do deslocamento nodal. Para isto, uma estrutura espacial tridimensional foi simulada em ambiente computacional e nela foram feitos os testes que determinaram os pontos ótimos para o posicionamento dos elementos ativos. Os resultados mostram que a determinação dos pontos ótimos através do método utilizado é uma boa opção para o controle de forma da estrutura espacial tridimensional proposta.

Palabras clave – Estruturas inteligentes, controle quase-estático, estruturas espaciais, elementos ativos.

1. INTRODUÇÃO

As estruturas espaciais apresentam-se uma solução viável para diversos problemas de engenharia. Essas estruturas são geralmente metálicas, com configuração tridimensional e podem ser encontradas sob as formas de coberturas, plataformas, antenas de transmissão, entre outras [1]. A área espacial tem intensificado e diversificado o uso destas estruturas por satisfazerem os requisitos para este campo de aplicação, reunindo características como baixo peso, grande extensão e ser de fácil construção [2].

No projeto de estruturas espaciais, é desejável que elas, em sua maioria, possuam um comportamento estático. Porém, devido ao tempo de operação e às condições do ambiente em que estão instaladas, estas estruturas ficam sujeitas à ação de distúrbios, os quais provocam variações estruturais. Estes distúrbios são de dois tipos: o transiente e o quase-estático [3]. O distúrbio transiente, a depender de sua intensidade, afeta a estrutura, deixando-a sem alterações, quando terminada sua ação. A maioria dos trabalhos tem buscado a eliminação deste tipo de distúrbio, sendo utilizado para isto, amortecedores de vibração [4]. O distúrbio quase-estático ocorre devido a fatores como: erros de fabricação, ação da corrosão, dilatação térmica ou ainda irregularidades do material de fabricação. Este distúrbio afeta a forma da estrutura, causando deformações, as quais chegam a ser quase imperceptíveis quando no início de sua ação [2]. Mesmo havendo mais pesquisas relacionadas aos distúrbios transientes, o interesse em estudar e controlar os distúrbios quase-estáticos tem sido crescente.

As exigências requeridas no projeto estruturas espaciais, faz com que seja necessário a implantação de algum tipo de sistema de controle que seja capaz de conter os distúrbios que afetam estas estruturas e/ou corrigir os efeitos provocados pela ação destes distúrbios, ou seja, o que se pretende é suprimir a vibração

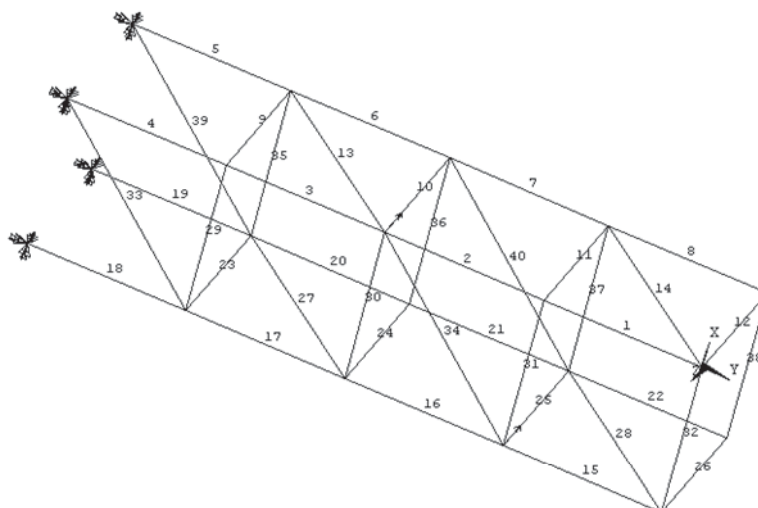


Fig. 1. Estrutura espacial.

e manter as especificações de forma dessas estruturas. Nos últimos anos um grande número de trabalhos tem sido desenvolvido abordando o uso de elementos ativos no controle ativo de vibração e no controle de forma de estruturas. Estes elementos são distribuídos na estrutura, trabalhando como elementos estruturais, sensores e atuadores e a eficiência do sistema de controle implantado é função do posicionamento dos elementos ativos na estrutura [1].

Neste trabalho, o posicionamento ótimo de elementos ativos para o controle de forma (quase-estático) de estruturas é apresentado. Para isto, uma estrutura espacial tridimensional foi simulada e ensaiada em computador e por meio dela foram determinados, pelo Método Exaustivo (ME) os pontos ótimos para o posicionamento dos elementos ativos.

2. ELEMENTOS ATIVOS E ESTRUTURAS INTELIGENTES

No tocante aos sistemas para controle de estruturas, uma das tecnologias que vem sendo investigada é a do uso de elementos ativos constituídos de materiais inteligentes. Existe um grande número de materiais inteligentes disponíveis para uso nestes sistemas, como os materiais piezoelétricos (PZT) e as ligas de memória de forma (SMA) [5]. Os materiais piezoelétricos oferecem vantagens como baixo peso e pouco consumo de energia [6], além de poderem ser usados de maneira distribuída e discreta e ainda fornecerem medições em tempo real [7]. Quanto ao funcionamento, os materiais piezoelétricos podem gerar uma tensão como resposta a estímulos mecânicos ou produzir um esforço mecânico quando um campo elétrico é aplicado em torno dele. Assim, comportamentos elétricos e mecânicos estão presentes nos materiais piezoelétricos. Devido suas vantagens e características eletromecânicas é que estes materiais podem ser utilizados tanto em sistemas de controle de vibração como em sistemas de controle de forma [8]. Uma estrutura composta de elementos ativos é considerada uma estrutura inteligente [9], devido a sua capacidade de controle em tempo real, podendo avaliar e corrigir, de forma automática e contínua, qualquer distúrbio que possa alterar seu correto funcionamento [5].

3. DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA PASSIVA

Para o estudo do controle quase-estático, uma estrutura tipo pórtico espacial tridimensional foi desenvolvida em computador. Ela é composta de quarenta elementos conectados entre si pelas suas extremidades, distribuídos em quatro vãos cúbicos, como mostrado na Fig. 1. Destes 40 elementos, 32 (elementos menores) estão distribuídos pelas arestas dos vãos cúbicos, e os 8 restantes (elementos maiores) se locali-

zam nas diagonais das arestas. Estes quarenta elementos são denominados passivos, por cumprirem apenas função estrutural.

A modelagem da estrutura foi realizada a partir da análise de um elemento estrutural, sendo para isto, tomada uma viga tridimensional livre-livre de seção transversal constante, com seis graus de liberdade em cada nó da suas extremidades, e cujas matrizes locais de massa e rigidez são simétricas, de ordem 12x12.

A matriz de rigidez $[K_e]$ para o elemento de viga, é dada pela equação (1), [10].

$$K_e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & az & 0 & 0 & 0 & c_z & 0 & b_z & 0 & 0 & 0 & c_z \\ 0 & 0 & a_y & 0 & d_y & 0 & 0 & 0 & b_y & 0 & d_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_y & 0 & e_y & 0 & 0 & 0 & c_y & 0 & f_y & 0 \\ 0 & cz & 0 & 0 & 0 & e_z & 0 & d_z & 0 & 0 & 0 & f_z \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_z & 0 & 0 & 0 & d_z & 0 & a_z & 0 & 0 & 0 & d_z \\ 0 & 0 & b_y & 0 & c_y & 0 & 0 & 0 & ay & 0 & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_y & 0 & f_y & 0 & 0 & 0 & c_y & 0 & e_y & 0 \\ 0 & c_z & 0 & 0 & 0 & f_z & 0 & d_z & 0 & 0 & 0 & e_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

Os índices $a_y, a_z, b_y, b_z, c_y, c_z, d_y, d_z, e_y, e_z, f_y$ e f_z , são apresentados nas equações (2) a (5) e são definidos como funções do momento de inércia (I) e do ângulo de cisalhamento (ϕ), os quais são determinados em relação aos eixos de referência y e z . Onde,

$$a_z = a(I_z, \phi_y); a_y = a(I_y, \phi_z) \quad (2)$$

$$b_z = b(I_z, \phi_y); b_y = b(I_y, \phi_z) \quad (3)$$

$$c_z = c(I_z, \phi_y); c_y = c(I_y, \phi_z) \quad (4)$$

$$d_z = d(I_z, \phi_y); d_y = d(I_y, \phi_z) \quad (5)$$

$$e_z = e(I_z, \phi_y); e_y = e(I_y, \phi_z) \quad (6)$$

$$f_z = f(I_z, \phi_y); f_y = f(I_y, \phi_z) \quad (7)$$

E = módulo de elasticidade, (Pa);

A = área da seção transversal da viga, (m^2);

G = módulo de elasticidade transversal, (Pa);

L = comprimento da viga, (m);

J = momento polar de inércia (J_x se $I_x = 0$ ou I_x se $I_x \neq 0$), (m^4).

$$a(I, \phi) = \frac{12EI}{L^3(1 + \phi)} \quad (8)$$

$$b(I, \phi) = \frac{-12EI}{L^3(1+\phi)} \quad (9)$$

$$c(I, \phi) = \frac{6EI}{L^2(1+\phi)} \quad (10)$$

$$d(I, \phi) = \frac{-6EI}{L^2(1+\phi)} \quad (11)$$

$$e(I, \phi) = \frac{(4+\phi)EI}{L(1+\phi)} \quad (12)$$

$$f(I, \phi) = \frac{(2-\phi)EI}{L(1+\phi)} \quad (13)$$

$$\phi_y = \frac{12EI_z}{GA_z^s L^2}; \quad \phi_z = \frac{12EI_y}{GA_y^s L^2} \quad (14)$$

A matriz de massa $[M_e]$, em coordenadas locais para o elemento de viga em questão é, dada pela equação (15), [11].

$$M_e = M_t \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_z & 0 & 0 & 0 & Cz & 0 & B_z & 0 & 0 & 0 & -D_z \\ 0 & 0 & A_y & 0 & -Cy & 0 & 0 & 0 & B_y & 0 & D_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\mathbf{J}_x}{3A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\mathbf{J}_x}{6A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C_y & 0 & E_y & 0 & 0 & 0 & -D_y & 0 & F_y & 0 \\ 0 & C_z & 0 & 0 & 0 & E_z & 0 & D_z & 0 & 0 & 0 & F_z \\ \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_z & 0 & 0 & 0 & D_z & 0 & A_z & 0 & 0 & 0 & -C_z \\ 0 & 0 & B_y & 0 & -Dy & 0 & 0 & 0 & A_y & 0 & Cy & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\mathbf{J}_x}{6A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\mathbf{J}_x}{3A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_y & 0 & F_y & 0 & 0 & 0 & Cy & 0 & E_y & 0 \\ 0 & -D_z & 0 & 0 & 0 & F_z & 0 & -C_z & 0 & 0 & 0 & E_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

Os índices $A_y, A_z, B_y, B_z, C_y, C_z, D_y, D_z, E_y, E_z, F_y$ e F_z são apresentados nas equações (16) a (21), e são definidos como funções do raio de giração (r) e de ϕ , os quais são determinados em relação aos eixos de referência y e z . Onde,

$$A_z = A(r_z, \phi_y); \quad A_y = A(r_y, \phi_z) \quad (16)$$

$$B_z = B(r_z, \phi_y); \quad B_y = B(r_y, \phi_z) \quad (17)$$

$$C_z = C(r_z, \phi_y); C_y = C(r_y, \phi_z) \quad (18)$$

$$D_z = D(r_z, \phi_y); D_y = D(r_y, \phi_z) \quad (19)$$

$$E_z = E(r_z, \phi_y); E_y = E(r_y, \phi_z) \quad (20)$$

$$F_z = F(r_z, \phi_y); F_y = F(r_y, \phi_z) \quad (21)$$

$$M_t = \rho AL \quad (22)$$

Onde:

ρ = massa específica do material (kg/m³);

J_x = momento polar de inércia eixo x , ($J_x = I_y + I_z$) (m⁴)

$$A(r, \phi) = \frac{\frac{13}{35} + \frac{7}{10}\phi + \frac{1}{3}\phi^2 + \frac{6}{5}\left(\frac{r}{L}\right)^2}{(1+\phi)^2} \quad (23)$$

$$B(r, \phi) = \frac{\frac{9}{70} + \frac{3}{10}\phi + \frac{1}{6}\phi^2 - \frac{6}{5}\left(\frac{r}{L}\right)^2}{(1+\phi)^2} \quad (24)$$

$$C(r, \phi) = \frac{\left(\frac{11}{210} + \frac{11}{120}\phi + \frac{1}{24}\phi^2 + \left(\frac{1}{10} - \frac{1}{2}\phi\right)\left(\frac{r}{L}\right)^2\right)L}{(1+\phi)^2} \quad (25)$$

$$D(r, \phi) = \frac{\left(\frac{13}{420} + \frac{3}{40}\phi + \frac{1}{24}\phi^2 - \left(\frac{1}{10} - \frac{1}{2}\phi\right)\left(\frac{r}{L}\right)^2\right)L}{(1+\phi)^2} \quad (26)$$

$$E(r, \phi) = \frac{\left(\frac{1}{105} + \frac{1}{60}\phi + \frac{1}{120}\phi^2 + \left(\frac{2}{15} + \frac{1}{6}\phi + \frac{1}{3}\phi^2\right)\left(\frac{r}{L}\right)^2\right)L^2}{(1+\phi)^2} \quad (27)$$

$$F(r, \phi) = \frac{-\left(\frac{1}{140} + \frac{1}{60}\phi + \frac{1}{120}\phi^2 + \left(\frac{1}{30} + \frac{1}{6}\phi - \frac{1}{6}\phi^2\right)\left(\frac{r}{L}\right)^2\right)L^2}{(1+\phi)^2} \quad (28)$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}; r_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} \quad (29)$$

A partir das matrizes locais de massa e rigidez do elemento foram obtidas as matrizes globais de massa e rigidez da estrutura. Para isto, foi desenvolvida uma rotina computacional em MATLAB[®], a qual forneceu as matrizes globais da estrutura. As análises, até então, consideraram a estrutura na condição passiva, ou seja, sem os elementos ativos.

4. DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA INTELIGENTE

Para a modelagem da estrutura inteligente (com elementos ativos), foram consideradas as características dos materiais que formam o elemento ativo, que é formado por uma barra retangular metálica de alumínio com placas de PZT distribuídas pela suas superfícies. Assim, a matriz global de rigidez da estrutura passou a apresentar, além das características da estrutura passiva, as características elétricas do material piezoelétrico e o acoplamento entre as variáveis mecânicas e elétricas. As matrizes de massa e rigidez da estrutura inteligente são apresentadas nas equações (30) e (31):

$$M = \begin{bmatrix} [M_{qq}] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$K = \begin{bmatrix} [K_{qq}] & [K_{qf}] \\ [K_{fq}] & [K_{ff}] \end{bmatrix} \quad (31)$$

Onde,

$[M_{qq}]$ = matriz de massa da estrutura (1);

$[K_{qq}]$ = matriz de rigidez referente à parte estrutural (15);

$[K_{qf}]$ e $[K_{fq}]$ = matrizes de acoplamento elétrico e mecânico ($[K_{fq}] = [K_{qf}]^T$);

$[K_{ff}]$ = matriz de rigidez referente à parte elétrica;

q = representa os deslocamentos nodais;

f = representa o potencial elétrico dos elementos ativos na estrutura;

As matrizes $[K_{qf}]$, $[K_{fq}]$ e $[K_{ff}]$, mostradas nas equações (32) e (33), possuem suas dimensões em função do número de elementos ativos escolhidos para a estrutura. No caso, por exemplo, da escolha de um elemento ativo, as dimensões das matrizes ($[K_{qf}]$, $[K_{fq}]$ e $[K_{ff}]$) são, respectivamente, 12×2 , 2×12 e 2×2 . Assim, para o caso da estrutura com um elemento ativo, as matrizes $[K_{qf}]$, $[K_{fq}]$ e $[K_{ff}]$ são:

$$[K_{qf}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{E_{pzt} d_{31} A_{pzt}}{2 h_{pzt}} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{E_{pzt} d_{31} A_{pzt}}{2 h_{pzt}} \left(\frac{h_{al}}{2} + \frac{h_{pzt}}{2} \right) \quad (32)$$

$$[K_{ff}] = -\left(e_{33} - E_{pzt} d_{31}^2 \right) \ell_e A_{pzt} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Onde,

E_{pzt} = módulo de elasticidade longitudinal PZT;

d_{31} = coeficiente piezoelétrico do PZT;

A_{pzt} = área do PZT ($A_{pzt} = 2 \cdot b_{pzt} \cdot h_{pzt}$);

h_{pzt} = altura da seção da barra de PZT;
 h_{al} = altura da seção da barra de alumínio;
 e_{33} = coeficiente dielétrico do PZT;
 l_e = comprimento da barra de alumínio.

5. POSICIONAMENTO DOS ELEMENTOS ATIVOS

A determinação dos pontos ótimos para a localização de elementos ativos em estruturas inteligentes é uma tarefa de extrema importância, pois a eficiência dos elementos ativos e, conseqüentemente da estrutura inteligente, está relacionada com esta escolha [6]. Por ser uma área que tem atraído à atenção dos pesquisadores, várias técnicas de posicionamento vêm sendo desenvolvidas ao longo dos anos. Muitos são os trabalhos que tratam deste tema relacionados às técnicas de posicionamento para controle de vibração [6,12]. No caso do controle quase-estático, o posicionamento dos elementos ativos tem sido abordado buscando-se determinar os pontos de maior deformação da estrutura, o que pode ser previsto por meio de simulações. Para o estudo de grandes estruturas espaciais, alguns autores têm recorrido a algoritmos de aproximação, tais como ESPS - Exhaustive Single Point Substitution, ISA - Improved Simulated Annealing, SA - Simulated Annealing, SLIM - Single Location Interactive Minimization, WOBI - Worst-Out-Best-In e DeLorenzo's Algorithm, [3,13-15]. Estas técnicas fornecem resultados exatos ou, na maioria das vezes, próximo da solução [13].

Em estruturas consideradas pequenas, a determinação das posições ótimas dos elementos ativos pode ser encontrada por meio do método exaustivo (ME), o qual fornece resultados mais exatos em relação aos obtidos pelos algoritmos de aproximação, uma vez que no ME os pontos ótimos são determinados por meio de combinação, onde são testadas todas as possíveis posições para os elementos ativos. Para uma estrutura com P elementos e Q atuadores, as possíveis combinações são obtidas com a equação (34):

$$C = \frac{P!}{Q!(P-Q)!} \quad (34)$$

No caso de uma estrutura bidimensional simples com 56 elementos, encontra-se em [13] que são possíveis 367290 combinações utilizando-se quatro elementos ativos. Aumentando-se a quantidade destes elementos para nove, este número passa a ser 7,58E+9. Observa-se então que o método exaustivo é viável apenas para pequenas estruturas com um número reduzido de elementos ativos, porque no caso de estruturas com muitos elementos e atuadores, o número de combinações (C) se torna impraticável. Neste trabalho, a estrutura inteligente utilizada é composta de quarenta elementos, e foram utilizados no máximo dois elementos ativos, havendo assim até 780 possíveis combinações para a obtenção dos pontos ótimos.

6. RESULTADOS

Foram determinados, pelo Método Exaustivo, os pontos de localização ótima para a estrutura inteligente em duas situações distintas, com apenas um elemento ativo e em seguida, com dois destes elementos. O critério utilizado foi o controle do deslocamento nodal, o qual requer que se estabeleça previamente, o nó e o respectivo deslocamento nodal que se pretende avaliar. Para isto, uma rotina desenvolvida em MATLAB[®] verificou e forneceu os deslocamentos do nó em estudo em função de todas as posições dos elementos ativos na estrutura, sendo a posição ótima aquela correspondente ao menor deslocamento do nó a ser controlado. Nos testes realizados, a estrutura foi deformada pela ação de uma força equivalente a um distúrbio quase-estático. O controle do deslocamento nodal foi aplicado aos nós 1 e 11, situados nas extremidades do elemento 32 da estrutura inteligente.

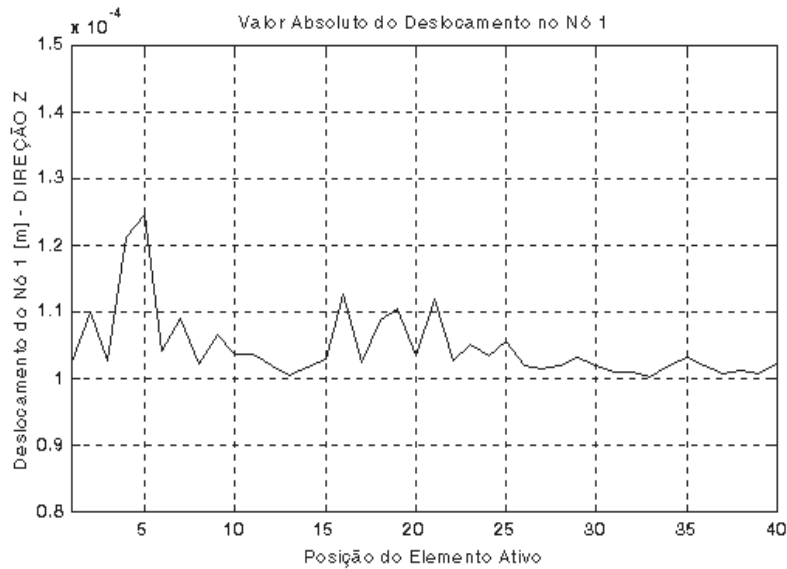


Fig. 2. Pontos ótimos para a estrutura com um elemento ativo - resultados para o nó 1.

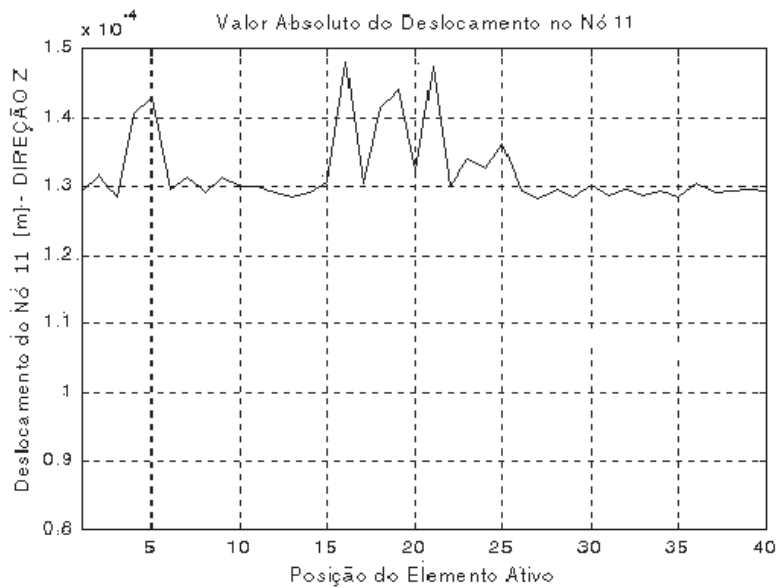


Fig. 3. Pontos ótimos para a estrutura com um elemento ativo - resultados para o nó 11.

Apresenta-se na Fig. 2 e Fig. 3., os valores dos deslocamentos nodais verificados para o nó 1 e para o nó 11, respectivamente, em função das posições do elemento ativo presente na estrutura.

Analisando a Fig. 2, observa-se que para o controle de deslocamento vertical do nó número 1 da estrutura, a posição ótima para o elemento ativo é a correspondente ao elemento 33, onde o valor do deslocamento é $1,0012E-4$ metros. No caso do controle do nó 11, a Fig. 3 mostra que a posição ótima ocorreu para o elemento ativo 27, com um deslocamento de $1,2816E-4$ metros.

Na seqüência, a estrutura foi ensaiada com vistas à obtenção dos pontos ótimos para o posicionamento de dois elementos ativos, mantendo-se, contudo, as mesmas condições dos testes anteriores.

Na Fig. 4 e Fig. 5 são mostradas as posições de dois elementos ativos, para o controle do deslocamento dos nós 1 e 11, respectivamente. Na Fig. 4 são apresentados os resultados para o nó 1, onde as posições ótimas são as correspondentes aos elementos 17 e 33, o que corresponde a um deslocamento de $9,7141E-$

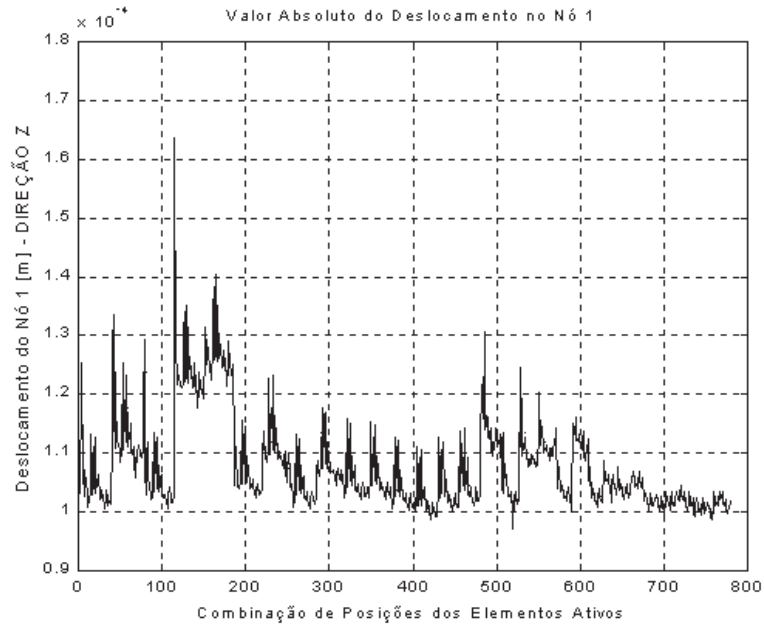


Fig. 4. Pontos ótimos para a estrutura com dois elementos ativos - resultados para o nó 1.

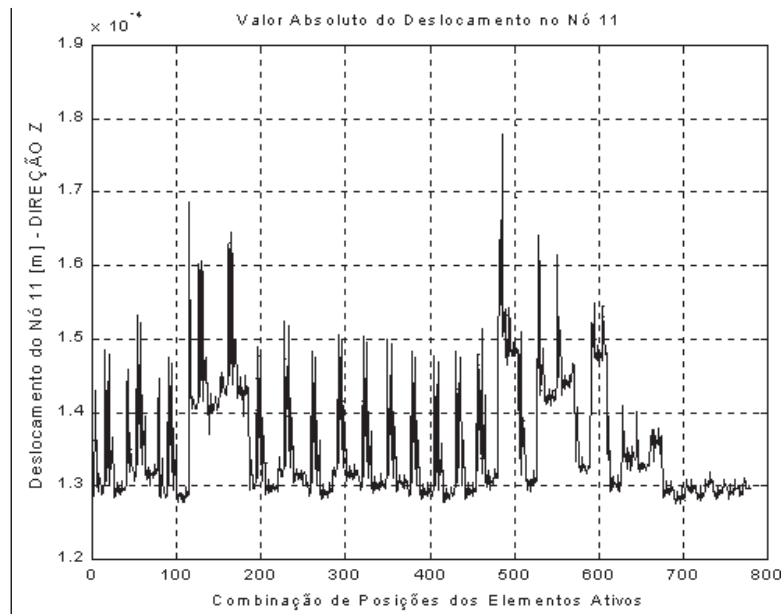


Fig. 5. Pontos ótimos para a estrutura com dois elementos ativos - resultados para o nó 11.

5 metros. Na Fig. 5 são apresentados os resultados para o nó 11, onde as posições ótimas são referentes aos elementos 27 e 35, cujo deslocamento é $1,2750E-4$ metros.

7. CONCLUSÕES

O posicionamento ótimo de elementos ativos por meio do método exaustivo, para o controle de forma em estruturas inteligentes, foi proposto. Para isto, uma estrutura espacial tridimensional foi desenvolvida e testada em computador. Na análise realizada a estrutura teve sua forma modificada devido a ação de um

distúrbio quase-estático. Em seguida procedeu-se a correção da estrutura, onde foram utilizados elementos ativos compostos de material piezoelétrico (PZT), distribuídos ao longo da estrutura. Por se tratar de uma estrutura complexa, sua modelagem matemática foi desenvolvida a partir da análise de um elemento de viga tridimensional. Primeiramente, a estrutura foi considerada passiva, donde foram obtidas as matrizes de massa e rigidez do elemento de viga e, em seguida, por meio de uma rotina computacional foram determinadas as matrizes da estrutura. Depois foram determinadas as matrizes de massa e rigidez da estrutura inteligente (com os elementos ativos). A eficiência do sistema de controle proposto é função da correta localização dos elementos ativos na estrutura. Esta localização equivale aos pontos onde a estrutura, uma vez sujeita a ação de um distúrbio, possa se corrigir retornando ao seu estado anterior ou próximo deste. A determinação destes pontos ótimos foi feita através do Método Exaustivo, que verificou os elementos ativos em todos os pontos na estrutura. O critério utilizado para a escolha dos pontos ótimos foi o controle do deslocamento nodal, onde se analisou um nó da estrutura e seu respectivo deslocamento em relação a um dos eixos ortogonais. A estrutura foi verificada em duas situações distintas, primeiro com um e em seguida com dois elementos ativos. Os resultados mostram que o controle de forma através da técnica de posicionamento proposta é eficiente, pois fornece o exato o posicionamento dos elementos ativos na estrutura espacial inteligente estudada, permitindo que esta, uma vez deformada pela ação de um distúrbio quase-estático, tenha sua forma corrigida.

REFERENCIAS

- [1] Rodrigues, L.B., “Avaliação da Integridade de uma Estrutura Espacial sob a Ação de Distúrbios Quase-Estáticos”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, Campus I, João Pessoa, PB (2001)
- [2] Hakim, S., Fuchs, M.B., “Optimal Actuator Placement with Minimum Worst Case Distortion Criterion”, *AIAA/ ASME/ ACSE/ AHS/ ASC 36th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, New Orleans (1995)
- [3] Haftka, R.T., Adelman, H.M., “Selection of Actuator Locations for Static Shape Control of Large Space Structures by Heuristic Integer Programming”, *Computers & Structures*, **20**(1-3), 575-582 (1985)
- [4] Haftka, R.T., Adelman, H.M., “Effect of Sensor and Actuator Errors on Static Shape Control for Large Space Structures”, *AIAA Journal*, **25**(1), 134-138 (1987)
- [5] Zou, Y., Tong, L., Steven, G.P., “Vibration-Based Model-Dependent Damage (Delamination) Identification and Health Monitoring for Composite Structures – A Review”, *Journal of Sound and Vibration*, **230**(2), 357-378 (2000)
- [6] Lammering, R., Jia, J., Rogers, C.A., “Optimal Placement of Piezoelectric Actuators in Adaptive Truss Structures”, *Journal of Sound and Vibration*, **171**(1), 67-85 (1994)
- [7] Varadan, V.V., Varadan, V.K., Bao, X.Q., Jeng J.-H., Sung, C.-C., “Active Control of Bending and Torsional Modes in Truss Structures”, *Journal of Sound and Vibration*, **167**(2), 263-275 (1993)
- [8] Chen, S.-H., Wang, Z.-D., Liu, X.-H., “Active Vibration Control and Suppression for Intelligent Structures”, *Journal of Sound and Vibration*, **200**(2), 167-177 (1997)
- [9] Banks, H.T., Iman, D.J., Leo D.J., Wang, Y., “An Experimentally Validated Damage Detection Theory in Smart Structures”, *Journal of Sound and Vibration*, **191**(5), 859-880 (1996)
- [10] Przemieniecki, J.S., *Theory of Matrix Structural Analysis*, McGraw-Hill, New York (1968)
- [11] Ansys Theory Reference, “ANSYS User’s Guide”, 9th Edition, Chapter 14, 13-15 (1994)
- [12] Aldraihem, O.J., Singh, T., Wetherhold, R.C., “Optimal Size and Location of Piezoelectric Actuators/Sensors: Practical Considerations”, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, **23**, 509-515 (2000)
- [13] Hakim, S., Fuchs, M.B., “Quasi-static Optimal Actuator Placement with Minimum Worst Case Distortion Criterion”, *AIAA Journal*, **34**(7), 1505-1511 (1996)
- [14] Onoda, J., Hanawa, Y., “Actuator Placement Optimization by Genetic and improved Simulated Annealing Algorithms”, *AIAA Journal*, **31**(6), 1167-1169 (1992)
- [15] Burdisso, R.A., Haftka, R.T., “Statistical Analysis of Static Shape Control in Space Structures”, *AIAA Journal*, **28**(8), 1504-1508 (1990)

SHAPE CONTROL OF A SMART SPACE STRUCTURE USING ACTIVE ELEMENTS

Abstract - In recent years the researches on vibration and shape control in structures using active elements has increased. Several active elements has been tested and used, although the elements developed from piezoelectric materials (PZT) are those with largest applications. The active elements are placed in the structure, working as structural elements, sensor and actuator. In order to get the high performance of the control system developed, many works have searched the optimal placement for the active elements, once this determination is a very important issue. This paper presents the optimal placement determination of active piezoelectric elements for shape control (quasi-static control) of space smart structures using the Exhaustive Method technique (EM) with the nodal displacement criteria. For this purpose, a three-dimensional smart space structure was developed with a computer program and then were determined the best points for the active elements placement. The results show that the best points determination through the used technique is a good option for quasi-static control of smart space structures.

Keywords – Smart Structures, Quasi-static Control, Space Structures, Active Elements.