



## POSICIONAMENTO ÓTIMO DE ELEMENTOS ATIVOS NO CONTROLE QUASE-ESTÁTICO DE ESTRUTURAS PELO MÉTODO EXAUSTIVO

### **Luciano Brito Rodrigues**

Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, DTRA.

Pç. Primavera, 40 – Primavera – Itapetinga – BA – Cep: 45700-000 - lucianobr@excite.com

### **José Felício da Silva**

Universidade Federal da Paraíba, DTM.

Caixa Postal 5053 - João Pessoa - PB – Cep: 58051-970 - felicio@funape.ufpb.br

### **Virgílio Mendonça Costa e Silva**

Universidade Federal da Paraíba, DTM.

### **José Alberto Araújo**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, DEM.

**Resumo.** *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 (ME) com o critério do deslocamento nodal. Para isto, uma estrutura espacial tridimensional foi projetada com um programa de computador 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 de estruturas espaciais tridimensionais.*

**Palavras-chave:** *Estruturas inteligentes, Controle quase-estático, Estruturas espaciais, Elementos ativos.*

## **1. INTRODUÇÃO**

As estruturas espaciais são 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 (Rodrigues, 2001). A área espacial, porém, 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 (Hakim e Fuchs, 1995).

No projeto de estruturas espaciais, é desejável que elas, em sua maioria, possam ter 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, segundo afirmam Haftka e Adelman (1985), são de dois tipos: o transiente e o quase-estático. 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 (Haftka e Adelman, 1987). 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 (Hakim e Fuchs, 1995). 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 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 (Rodrigues, 2001).

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**

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) (Zou et al, 2000). Os materiais piezoelétricos, por sua vez, oferecem vantagens como baixo peso e pouco consumo de energia (Lammering et al, 1994), além de poderem ser usados de maneira distribuída e discreta e ainda fornecerem medições em tempo real (Varadan et al, 1993). 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 (Chen et al., 1997). Uma estrutura composta de elementos ativos é considerada como uma estrutura inteligente (Banks et al, 1996), devido a sua capacidade de controle em tempo real, podendo avaliar e corrigir, de forma automática e contínua, qualquer distúrbio que possa alterar o correto funcionamento da estrutura (Zou et al, 2000).

## **3. MODELAGEM MATEMÁTICA**

Para o estudo do controle quase-estático, uma estrutura pórtico espacial tridimensional foi implementada em computador, Fig. (1). Ela é composta de quarenta elementos conectados entre si pelas suas extremidades, distribuídos em quatro vãos cúbicos. Destes 40 elementos, 32 (elementos menores) estão distribuídos pelas arestas dos vãos cúbicos, e os 8 restantes (elementos maiores) se localizam nas diagonais das arestas. Estes quarenta elementos são denominados passivos, por atuarem apenas como elemento estrutural.

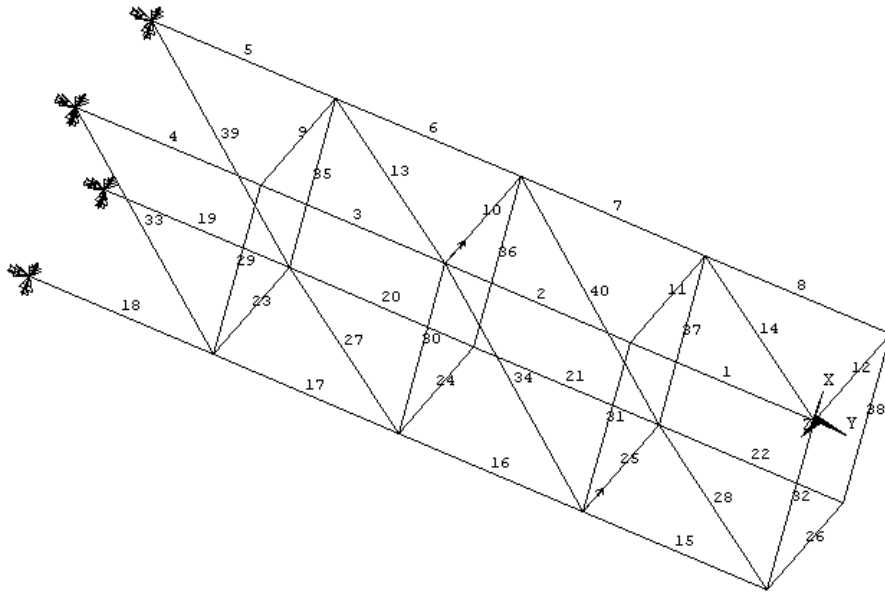


Figura 1. Estrutura espacial

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 12 x 12.

A matriz de rigidez  $[K_e]$  para o elemento de viga, é (Przemieniecki, 1968):

$$K_e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & az & 0 & 0 & 0 & cz & 0 & bz & 0 & 0 & 0 & cz \\ 0 & 0 & ay & 0 & dy & 0 & 0 & 0 & by & 0 & dy & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dy & 0 & ey & 0 & 0 & 0 & cy & 0 & fy & 0 \\ 0 & cz & 0 & 0 & 0 & ez & 0 & dz & 0 & 0 & 0 & fz \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & bz & 0 & 0 & 0 & dz & 0 & az & 0 & 0 & 0 & dz \\ 0 & 0 & by & 0 & cy & 0 & 0 & 0 & ay & 0 & cy & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dy & 0 & fy & 0 & 0 & 0 & cy & 0 & ey & 0 \\ 0 & cz & 0 & 0 & 0 & fz & 0 & dz & 0 & 0 & 0 & ez \end{bmatrix} \quad (1)$$

Os índices  $ay$ ,  $az$ ,  $by$ ,  $bz$ ,  $cy$ ,  $cz$ ,  $dy$ ,  $dz$ ,  $ey$ ,  $ez$ ,  $fy$  e  $fz$ , são definidos como funções do momento de inércia ( $I$ ) e do ângulo de cisalhamento ( $\phi$ ), os quais são determinados em relação aos eixos de referência  $y$  e  $z$ . Onde,

$$az = a(Iz, \phi y); ay = a(Iy, \phi z) \quad (2)$$

$$bz = b(Iz, \phi y); by = b(Iy, \phi z) \quad (3)$$

$$cz = c(Iz, \phi y); cy = c(Iy, \phi z) \quad (4)$$

$$dz = d(Iz, \phi y); dy = d(Iy, \phi z) \quad (5)$$

$$ez = e(Iz, \phi y); ey = e(Iy, \phi z) \quad (6)$$

$$fz = f(Iz, \phi y); fy = f(Iy, \phi z) \quad (7)$$

E = módulo de elasticidade; A = área da seção transversal da viga; G = módulo de elasticidade transversal; L = comprimento da viga; J = momento polar de inércia (Jx se Ix = 0 ou Ix se Ix ≠ 0).

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

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

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

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

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

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

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

A matriz de massa [M<sub>e</sub>], em coordenadas locais para o elemento de viga em questão é, (ANSYS Theory Reference, 1994).

$$M_e = M_t \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Az & 0 & 0 & 0 & Cz & 0 & Bz & 0 & 0 & 0 & -Dz \\ 0 & 0 & Ay & 0 & -Cy & 0 & 0 & 0 & By & 0 & Dy & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{J_x}{3A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{J_x}{6A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Cy & 0 & Ey & 0 & 0 & 0 & -Dy & 0 & Fy & 0 \\ 0 & Cz & 0 & 0 & 0 & Ez & 0 & Dz & 0 & 0 & 0 & Fz \\ \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Bz & 0 & 0 & 0 & Dz & 0 & Az & 0 & 0 & 0 & -Cz \\ 0 & 0 & By & 0 & -Dy & 0 & 0 & 0 & Ay & 0 & Cy & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{J_x}{6A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{J_x}{3A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Dy & 0 & Fy & 0 & 0 & 0 & Cy & 0 & Ey & 0 \\ 0 & -Dz & 0 & 0 & 0 & Fz & 0 & -Cz & 0 & 0 & 0 & Ez \end{bmatrix} \quad (15)$$

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 definidos como funções do raio de giração ( $r$ ) e de  $\phi$ , os quais são determinados em relação aos eixos de referência  $y$  e  $z$ . Onde,

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

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

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

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

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

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

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

$\rho$  = massa específica do material;  $J_x$  = momento polar de inércia eixo  $x$  ( $J_x = I_y + I_z$ ).

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

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

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

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

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

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

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

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 (sem os elementos ativos).

Para a modelagem da estrutura com elementos ativos, foi necessário considerar as características dos materiais que formam o elemento ativo, que na verdade é um elemento híbrido, formado por uma barra retangular metálica (alumínio) com placas de PZT distribuídas pela suas superfícies. Desta forma, a matriz global de rigidez da estrutura passou também a apresentar, além das características da estrutura passiva, as características elétricas do material piezoelétrico e o acoplamento entre as variáveis mecânicas e elétricas. Assim, as matrizes de massa e rigidez da estrutura espacial inteligente são:

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

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

Onde,  $[M_{qq}]$  – matriz de massa da estrutura (Eq. 1);  $[K_{qq}]$  – matriz de rigidez referente à parte estrutural (Eq. 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  $[K_{ff}]$ , 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,  $12 \times 2$ ;  $2 \times 12$  e  $2 \times 2$ . Assim, para o caso da estrutura com um elemento ativo, as matrizes  $[K_{qf}]$ ,  $[K_{fq}]$  e  $[K_{ff}]$  são:

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

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

Onde,  $E_{pzt}$  = módulo de Young do 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;  $h_{alm}$  = altura da seção da barra de alumínio;  $\epsilon_{33}$  = coeficiente dielétrico do PZT;  $\ell_e$  = comprimento da barra de alumínio.

#### 4. POSICIONAMENTO DOS ELEMENTOS ATIVOS

Dentre as pesquisas envolvendo o uso de elementos ativos feitos de material piezoelétrico, muitas têm concentrado sua atenção em determinar os pontos ótimos para a localização destes

elementos na estrutura. Esta é uma tarefa extremamente importante no projeto de estruturas ativamente controladas, pois a eficiência dos elementos ativos está relacionada com a escolha correta de seu posicionamento (Lammering et al, 1994). Por ser uma área que tem atraído à atenção dos pesquisadores, várias técnicas de posicionamento vêm sendo desenvolvidas ao longo dos anos. Lammering et al (1994) e Aldraihem et al (2000) trazem considerações sobre trabalhos que tratam deste tema relacionados às técnicas de posicionamento para controle de vibração. 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, (Hakim e Fuchs, 1996; Onoda e Hanawa, 1992; Burdisso e Haftka, 1990 e Haftka e Adelman, 1985). Estas técnicas, segundo afirmam Hakim e Fuchs (1996), fornecem resultados exatos ou, na maioria das vezes, próximo da solução.

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 por:

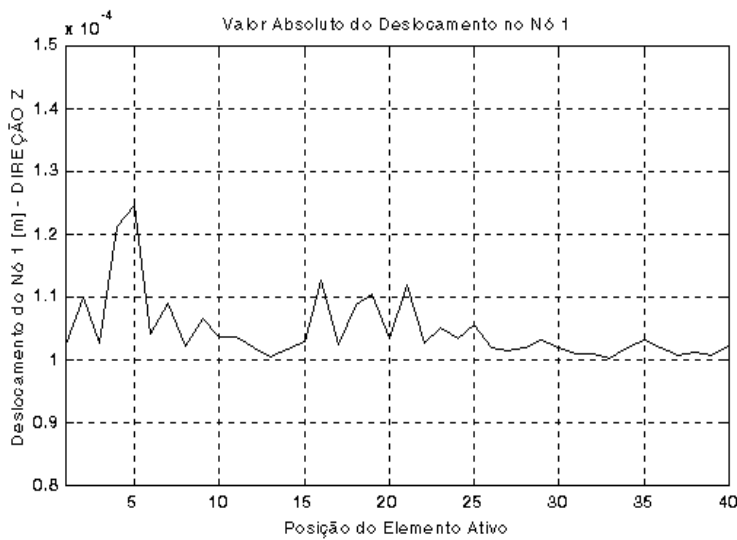
$$C = \frac{P!}{Q!(P-Q)!} \quad (34)$$

No caso de uma estrutura bidimensional simples com 56 elementos, Hakim e Fuchs (1996) mostram que as combinações utilizando-se quatro atuadores são 367290. Aumentando-se a quantidade de atuadores 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 espacial é composta de quarenta elementos, onde foram utilizados no máximo dois elementos ativos, havendo assim até 780 possíveis combinações para a obtenção dos pontos ótimos.

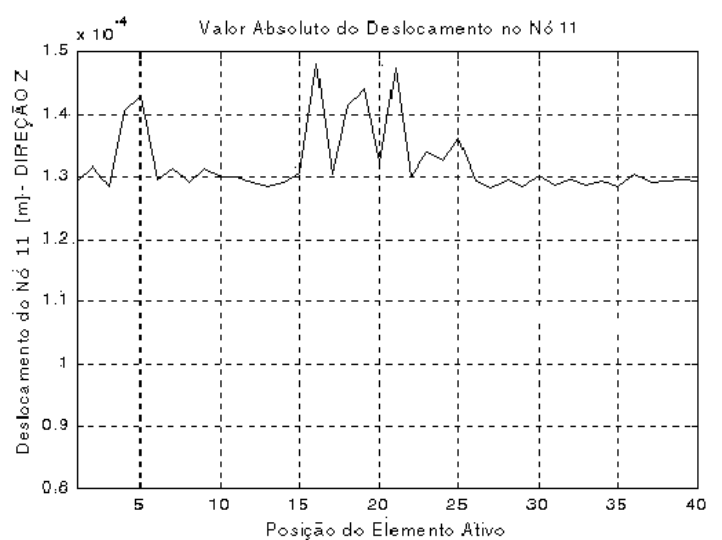
## 5. RESULTADOS

Foram determinados, pelo ME, os pontos de localização ótima para a estrutura 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 construída 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, Fig. (1).

A Fig. (2) apresenta os valores dos deslocamentos nodais verificados para o nó 1 (a) e para o nó 11 (b), em função das posições do elemento ativo presente na estrutura.



(a) Resultados para o nó 1



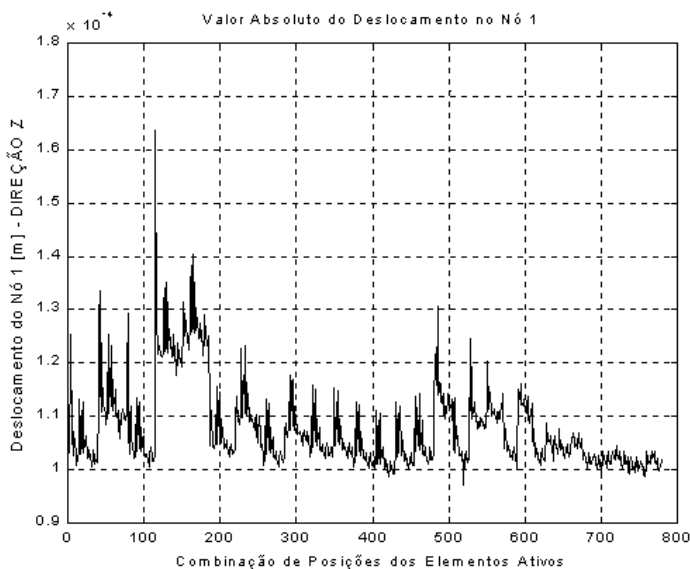
(b) Resultados para o nó 11

Figura 2. Pontos ótimos para a estrutura com um elemento ativo

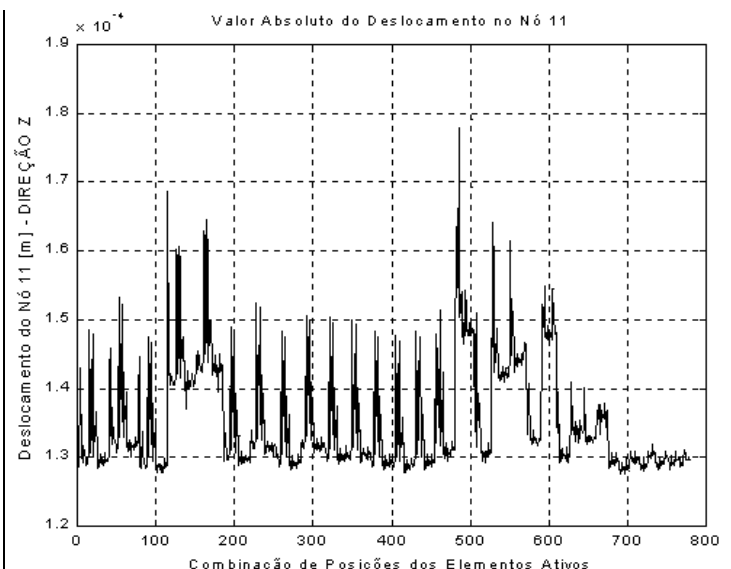
Analisando o gráfico (a) da Fig. (2), observa-se que para o controle de deslocamento vertical do nó número 1 da estrutura, a posição ótima para o elemento ativo é a correspondente ao elemento 33, onde o valor do deslocamento é  $1.0012E-4$  metros. No caso do controle do nó 11, o gráfico (b) mostra que a posição ótima ocorreu para o elemento ativo 27, com um deslocamento de  $1.2816E-4$  m.

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.

Os resultados da Fig. (3), mostram as posições de dois elementos ativos, para o controle do deslocamento dos nós 1 (a) e 11 (b). O gráfico (a) da Fig. (3) apresenta 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  $9.7141E-5$  m. O outro gráfico (b) traz os resultados para o nó 11, onde as posições ótimas são referentes aos elementos 27 e 35, cujo deslocamento é  $1.2750E-4$  m.



(a) Resultados para o nó 1



(b) Resultados para o nó 11

Figura 3. Pontos ótimos para a estrutura com dois elementos ativos



## 6. CONCLUSÕES

O posicionamento ótimo de elementos ativos para o controle de distúrbios quase-estáticos por meio do método exaustivo foi proposto. Para isto, uma estrutura espacial tridimensional foi implementada e ensaiada em computador, onde em sua análise, a estrutura teve sua forma modificada devido a ação de um distúrbio quase-estático. Daí partiu-se para correção da estrutura, onde foram utilizados elementos ativos feitos de material piezelétrico (PZT), distribuídos ao longo da estrutura. Por se tratar de uma estrutura complexa, sua modelagem foi desenvolvida a partir da análise de um elemento de viga tridimensional. Primeiramente, a estrutura foi considerada sem a presença dos elementos ativos, donde foram obtidas as matrizes de massa e rigidez do elemento de viga e, em seguida, da estrutura passiva. Depois foram determinadas as matrizes de massa e rigidez da estrutura com os elementos ativos (estrutura inteligente). A eficiência do sistema de controle proposto é função da correta localização dos elementos ativos na estrutura. Esta correta localização equivale aos pontos para o qual a estrutura, uma vez sujeita a ação de um distúrbio, possa ser corrigida através dos elementos ativos retornando ao seu estado anterior ou próximo deste. A determinação destes pontos ótimos foi feita através do Método Exaustivo (ME), o qual verificou todas as posições para os elementos ativos 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 tridimensional estudada, permitindo que esta, uma vez deformada pela ação de um distúrbio quase-estático, tenha sua forma corrigida.

## 7. REFERÊNCIAS

- Aldraihem, O.J., Singh, T. and Wetherhold, R.C., 2000, "Optimal Size and Location of Piezoelectric Actuators/Sensors: Practical Considerations". *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 23, No 3, pp 509-515.
- Ansys Theory Reference, 1994, "ANSYS user's guide", 9<sup>th</sup> Edition, Chapter 14, pp. 13-15.
- Banks, H.T., Iman, D.J., Leo, D.J. and Wang, Y., 1996, "An Experimentally Validated Damage Detection Theory in Smart Structures". *Journal of Sound and Vibration*, 191(5), pp. 859-880.
- Burdisso, R.A, and Haftka, R.T., 1990, "Statistical Analysis of Static Shape Control in Space Structures". *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 8, pp 1504-1508.
- Chen, S.-H, Wang, Z.-D and Liu, X.-H, 1997 "Active Vibration Control and Suppression for Intelligent Structures". *Journal of Sound and Vibration* 200 (2), 167-177.
- Haftka, R.T. and Adelman, H.M., 1985, "Selection of Actuator Locations for Static Shape Control of Large Space Structures by Heuristic Integer Programming". *Computers & Structures*, Vol. 20, No. 1-3, pp 575-582.
- Haftka, R.T. and Adelman, H.M., 1987, "Effect of Sensor and Actuator Errors on Static Shape Control for Large Space Structures". *AIAA Journal*, Vol. 25, No. 1, pp 134-138.
- Hakim, S. and Fuchs, M.B., 1995, "Optimal Actuator Placement with Minimum Worst Case Distortion Criterion". *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1137-CP, pp 3506-3514.
- Hakim, S. and Fuchs, M.B., 1996, "Quasistatic Optimal Actuator Placement with Minimum Worst Case Distortion Criterion". *AIAA Journal*, 1137-CP, pp 3506-3514.
- Lammering, R., Jia, J. and Rogers, C.A., 1994. "Optimal Placement of Piezoelectric Actuators in Adaptive Truss Structures". *Journal of Sound and Vibration*, 171 (1), 67-85, Academic Press.
- Onoda, J and Hanawa, Y., 1992, "Actuator Placement Optimization by Genetic and improved Simulated Annealing Algorithms". *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 6, Technical Notes, pp 1167-1169.

- Przemieniecki, J.S., 1968, "Theory of Matrix Structural Analysis". McGraw-Hill.
- Rodrigues, L.B., 2001, "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.
- Varadan, V.V., Varadan, V.K., Bao, X.Q., Jeng, J.-H. and Sung C.-C., 1993. "Active Control of Bending and Torsional Modes in Truss Structures". Journal of Sound and Vibration, 167 (2), 263-275, Academic Press.
- Zou, Y., Tong, L. and Steven, G.P., 2000. "Vibration-Based Model-Dependent Damage (Delamination) Identification and Health Monitoring for Composite Structures – A Review". Journal of Sound and Vibration, 230 (2), 357-378.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

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

### OPTIMAL PLACEMENT OF ACTIVE ELEMENTS FOR QUASI-STATIC CONTROL USING THE EXHAUSTIVE METHOD

#### **Luciano Brito Rodrigues**

Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, DTRA.

Pç. Primavera, 40 – Primavera – Itapetinga – BA – Cep: 45700-000 - lucianobr@excite.com

#### **José Felício da Silva**

Universidade Federal da Paraíba, DTM.

Caixa Postal 5053 - João Pessoa - PB - Cep: 58051-970 - felicio@funape.ufpb.br

#### **Virgílio Mendonça Costa e Silva**

Universidade Federal da Paraíba, DTM.

#### **José Alberto Araújo**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, DEM.

***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 structures using the Exhaustive Method technique (EM) with the nodal displacement criteria. For this purpose, a three-dimensional space structure was developed with a computer program and then were determined the best points for the active elements placement. The results shows that the best points determination through the technique used is a good option for quasi-static control of space structures.*

***Key words.** Smart structures, Quasi-static control, Space structures, Active elements.*