



PIBIC/CNPq/UFPG-2010

ATUADORES HÍBRIDOS ATIVOS USANDO ELEMENTOS PIEZOELÉTRICOS E MATERIAL COM MEMÓRIA DE FORMA PARA ATUAR NO CONTROLE DE VIBRAÇÃO E RUÍDO.

Angelo Emiliavaca¹, Cícero da Rocha Souto²

RESUMO

Esse trabalho visa demonstrar conhecimentos adquiridos de várias áreas das ciências dos materiais como a transformação de fase do material que causa o efeito de memória de forma (LMF) em algumas ligas metálicas e como esses materiais se comportam quando submetidos à variação de temperatura e carregamento. Esses conhecimentos permitem aprimorar a habilidade de identificar e entender esse efeito, visando assim à aplicação desses materiais como atuadores. De forma semelhante como ocorre o efeito de geração de energia elétrica e de deformação mecânica nas cerâmicas piezoelétricas quando são submetidas a uma deformação mecânica ou quando alimentadas eletricamente respectivamente. Esses atuadores acoplados a estruturas mecânicas que vibram devido à incidência de um carregamento oscilatório provocam a redução do nível de vibração mecânica com aplicação de força no sentido oposto ao movimento vibratório. Modelos matemáticos e simulações numéricas foram implementados desde a concepção dos atuadores híbridos até a consolidação. Sistemas de controle ativo foram estudados para aplicação com os atuadores. Uma estrutura de viga, usando o atuador piezoelétrico, foi desenvolvida na intenção de coletar informações sobre a atuação do PZT sobre ela.

Palavras-chave: atuador piezoelétrico, atuador com liga com memória de forma, controle de vibração.

ACTUATORS USING HYBRID ACTIVE ELEMENTS AND PIEZOELECTRIC MATERIAL WITH SHAPE MEMORY TO ACT TO CONTROL VIBRATION AND NOISE

ABSTRACT

This paper demonstrates knowledge of various areas of materials sciences as the phase transformation of the material that causes the shape memory effect (LMF) in some alloys and how these materials behave when subjected to temperature variations and loading. These skills can help improve the ability to identify and understand this effect, thereby aiming at the application of these materials as actuators. In a similar way as is the effect of power generation and mechanical deformation in piezoelectric ceramics when subjected to a mechanical deformation or when powered electrically respectively. These actuators coupled to mechanical structures that vibrate due to the impact of an oscillatory loading causes a reduction in the level of mechanical vibration with application of force in the direction opposite to vibration. Mathematical models and numerical simulations have been implemented since the design of hybrid actuators to the consolidation. Active control systems have been studied for use with the actuators. A beam structure using piezoelectric actuators, was developed with the intention of collecting information about the performance of PZT on it.

Keywords: piezoelectric actuator, actuator with shape memory alloy, vibration control.

INTRODUÇÃO

¹ Aluno do Curso de Engenharia Mecânica, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: angelosite2003@hotmail.com

² Engenheiro Mecânico, Professor, Doutor, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: cicero@dem.ufpg.edu.com

Atualmente os níveis excessivos de vibração e ruído associados às máquinas e equipamentos em funcionamento, é uma preocupação cada vez maior tanto por razões de desempenho da máquina quanto o conforto do operador (Oliveira, 2007, Baudry *et al.*, 2005). Esses níveis elevados de vibração e ruído podem estar relacionados a desalinhamento ou desbalanceamento de peças rotativas, desgastes acentuados de peças, lubrificação inadequada ou procedimento de montagem incorreto. Entretanto, algumas máquinas ou componentes de máquinas, como motores, geradores e turbinas, são ruidosas naturalmente, e como é necessário o uso desses equipamentos, o problema da vibração e ruído, acaba fazendo parte do cotidiano de grandes indústrias como, por exemplo, a de petróleo e gás. Na intenção de incentivar a encontrar soluções para tais problemas, as leis ambientais e de proteção ao bem estar do ser humano têm feito exigências para que esse problema seja minimizado. Sendo assim é necessário que soluções práticas sejam encontradas para resolver esse problema.

O uso de materiais piezoelétricos, como atuadores no controle ativo de vibração em estruturas, tem aumentado significativamente desde a década passada. Esses materiais quando submetidos a um campo elétrico induzem uma deformação mecânica e quando sofrem uma deformação mecânica induzem um campo elétrico. Comparados com outros atuadores convencionais pontuais (shakers, alto-falantes), os atuadores piezoelétricos demonstraram características superiores, por serem leves e terem tamanho reduzido (Gardonio *et al.*, 2003, Gardonio *et al.*, 2004). Sendo assim, vários trabalhos com painéis inteligentes vêm sendo desenvolvidos na tentativa de reduzir vibrações e/ou ruído (Souto, 2008, Carneal *et al.*, 2004 Park *et al.* 2000, Silva, 1998). Entretanto, nem sempre é possível se conseguir níveis de redução adequados, e, nesse caso, alguns pesquisadores têm estudado a possibilidade do uso de atuadores híbridos com PZT (titanato zirconato de chumbo) e PVDF (fluoreto de polivinidileno) (Kaizuka *et al.*, 2006).

As ligas com memória de forma (LMF) possuem a capacidade de voltar a uma forma previamente definida assim como variação de rigidez quando submetidas a ciclos aquecimento-resfriamento pré-determinados. Os LMF possuem uma pseudo-elasticidade sendo, em geral, facilmente deformados plasticamente a temperaturas relativamente baixas, e ao serem expostos a uma temperatura considerada crítica retornam a sua forma inicial. Quando esse efeito manifesta-se somente durante o aquecimento, trata-se de um “one-way shape memory effect” (memória de forma simples), se a propriedade manifesta-se também durante o arrefecimento, trata-se de um “two-way shape memory effect” (efeito de memória duplo). Um grande gama de materiais pode apresentar esse efeito, no entanto, só são produzidos os que são comercialmente viáveis que são ligas com grande capacidade de deformação ou as que produzam uma força significativa durante a sua contração.

Como o efeito dessas ligas é ativado via introdução de calor (variação de temperatura) a sua velocidade de atuação (encurtamento e alongamento) é relativamente baixa quando comparada com outros materiais ativos, para minimizar este problema e aumentar a velocidade de atuação e retorno a forma original utiliza-se um sistema de refrigeração termoelétrica.

Embora as ligas com memória de forma possuam características formidáveis, nem sempre é possível, apenas com ela, conseguir resultados desejados para o controle de vibração e/ou ruído. Assim, pode ser uma alternativa viável, combinar os materiais piezoelétricos com as ligas de memória para o desenvolvimento de atuadores híbridos para tal propósito.

MATERIAL E METODO

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Estruturas Mecânicas e Materiais Inteligentes do Departamento de Engenharia Mecânica no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande – PB.

Ligas com Memória de Forma

As ligas com memória de forma (LMF) são materiais metálicos especiais que possuem a capacidade de recuperar uma deformação aparentemente plástica, introduzida a uma baixa temperatura, por intermédio de um aquecimento subsequente, acima de uma temperatura dita crítica. Este fenômeno, denominado “efeito memória de forma (EMF)”, está intimamente associado a uma transformação de fase do tipo martensítica, cristalograficamente reversível (Otsuka e Wayman, 1998; Mallik *et al.*, 2005). A deformação é introduzida na fase de baixa temperatura (martensita) e um simples aquecimento transforma o material para a fase de alta temperatura (austenita), resultando na recuperação da forma previamente estabelecida. Em geral, o deslocamento desejado é obtido através da aplicação de pulsos de corrente elétrica (efeito Joule) e neste caso, a LMF é considerada um atuador elétrico. Porém, se o acionamento (aquecimento e resfriamento) é realizado por intermédio da variação controlada da temperatura ambiente (convecção forçada, por exemplo) ou por condução térmica, a LMF é considerada um atuador térmico. Assim, uma LMF pode ser considerada intrinsecamente como um atuador eletro-termomecânico que converte energia térmica em deslocamento, acompanhada ou não, da produção de um trabalho mecânico (Srinivasan & McFarland, 2001).

Quando esse efeito manifesta-se somente durante o aquecimento, trata-se de um “one-way shape memory effect” (memória de forma simples), se a propriedade manifesta-se também durante o arrefecimento, trata-se de um “two-way shape memory effect” (efeito de memória duplo).

Para este trabalho a geometria adotada para a liga com memória de forma foi um disco, e como não é uma geometria comercial, fez-se necessário fundir uma carga composta por 52% em massa de Ti e 48 % em massa de Ni, estas proporções foram determinadas a partir da análise da faixa de temperatura de transformação de fase da liga com memória de forma. Após ter sido fundida em um forno a plasma, a carga foi injetada em um molde cilíndrico e depois foi submetida a um processo de usinagem de forma a tornar-se um disco com faces paralelas e perfeitamente lisas. Após o processo de usinagem o disco foi submetido a tratamento térmico em um forno à vácuo sob uma temperatura de 450°C por 20 minutos seguido de tempera em água. Após ter realizado o tratamento térmico foi feito um teste de resistividade elétrica para sua caracterização em termos de temperatura de transformação de fase. Este ensaio consiste em induzir uma corrente elétrica no elemento que se deseja obter as propriedades elétricas, através de dois terminais soldados, e em paralelo fazer a leitura da variação da corrente em outros dois terminais, utilizando o sistema de refrigeração desenvolvido no LaMMEA com o uso de células de Peltier para acelerar o processo de resfriamento geralmente feito em um banho de sais.

A Figura (1) apresenta os resultados obtidos do ensaio de resistividade elétrica onde pode-se observar pela mudança na curva de resfriamento que a temperatura de transformação de fase do disco está na faixa entre 50°C e 70°C dentro do esperado já que para o experimento o disco será aquecido pela máquina térmica que tanto funcionará para aquecer como para resfriar o atuador sendo este controle realizado por um programa desenvolvido no ambiente LabView.

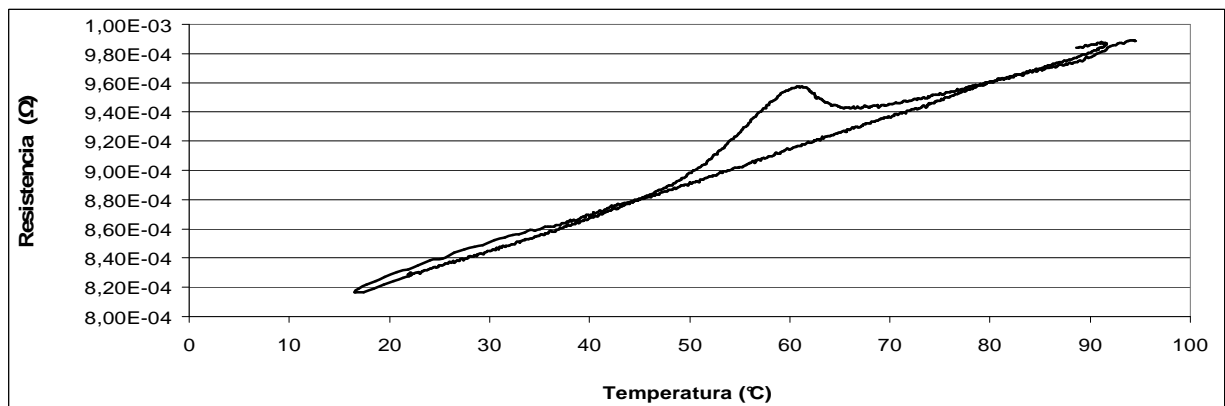


Figura 1. Temperatura de transformação de fase obtida pelo teste de resistividade elétrica.

Desenvolvimento da máquina térmica

Para a continuidade da pesquisa foi necessário a idealização de uma máquina térmica que acomodasse o disco de LMF e simulasse a variação de temperatura, ou seja, aquecimento e resfriamento. Para esse desenvolvimento foram utilizadas três células de Peltier e um cooler com refrigeração forçada.

O efeito Peltier consiste da produção de um gradiente de temperatura em duas junções de dois condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando submetidos a uma tensão elétrica em um circuito fechado. Esse efeito também conhecido como *Força eletromotriz de Peltier* é o reverso do efeito Seebeck em que ocorre produção de diferença de potencial devido à diferença de temperatura neste mesmo tipo de sistema. Células dotadas desse efeito são utilizadas como refrigeradores.

Os dispositivos práticos de efeito Peltier usam semicondutores para uma maior densidade de corrente e conseqüentemente de potência. Em geral o material semicondutor é telureto de bismuto altamente dopado para criar semicondutores tipo P e tipo N. A Figura (2) mostra um esquema de uma célula de Peltier.

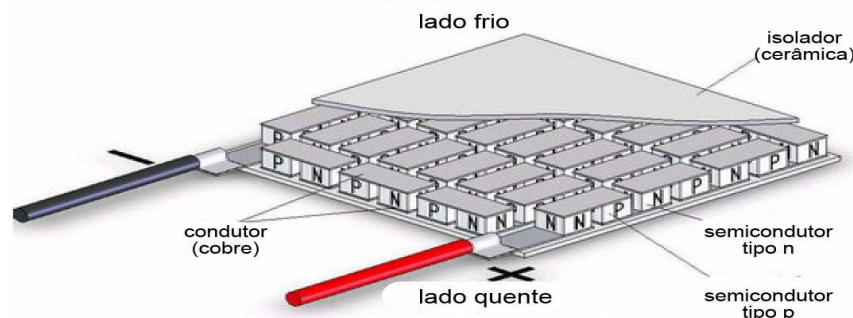


Figura 2. Célula de Peltier (<http://www.kryotherm.ru/porto.phtml>)

O water cooler é um dispositivo comercial utilizado corriqueiramente para refrigeração de microprocessadores de alta performance. Esse é constituído de uma placa de cobre por onde passam tubos que circulam transversalmente por aletas de alumínio. Através dos tubos é conduzido um fluido refrigerante que retira o calor da placa de cobre e perde para as aletas mantendo a superfície de cobre com a menor temperatura possível, ou seja, dissipa o calor produzido na face quente da célula de Peltier aumentando a eficiência de resfriamento do sistema. Para essa montagem o water cooler teve sua posição invertida. Para essa finalidade, foi necessária a construção de uma estrutura que garantisse o funcionamento do water cooler de forma invertida. A Figura (3) mostra a máquina térmica desenvolvida.

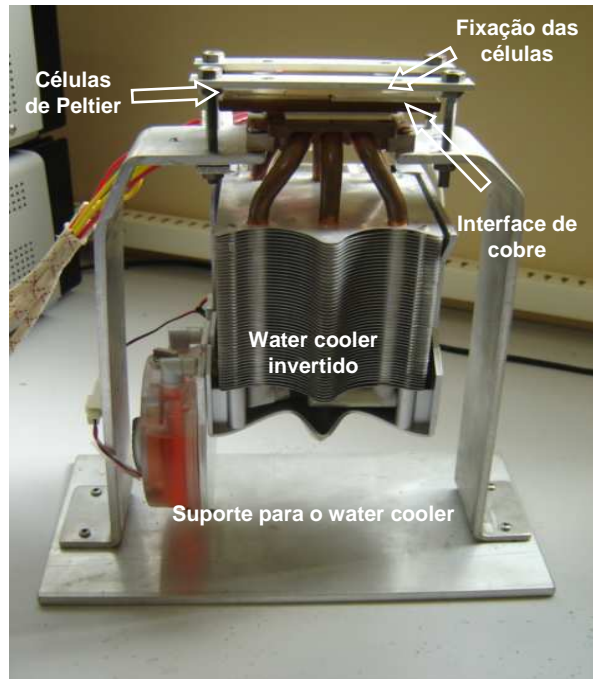


Figura 3. Máquina Térmica.

Foi necessário manter uma pressão sobre as pastilhas de Peltier utilizando uma barra de alumínio para diminuir a resistência térmica de contato, assim ocorre maior eficiência na condutividade térmica. Para garantir um gradiente de temperatura maior que $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, adotou-se o uso de três pastilhas de Peltier, uma de 136W sobre o cooler seguido de uma placa de cobre (para homogeneizar a transferência de calor entre as pastilhas) e as outras duas pastilhas cada uma com 91W na parte superior do cobre.

O controle da corrente que passa pelas células de Peltier é feito por uma fonte de tensão contínua. As temperaturas em diversos pontos da estrutura são aquisitadas através de uma placa de aquisição de dados juntamente com o programa computacional Labview. A Figura (4) apresenta um esquema do sistema com uma célula de Peltier e um termopar na superfície quente da célula.



Figura (3) – Esquema genérico do funcionamento da máquina térmica parcial e completa com o disco

Aplicação da cerâmica piezoelétrica como sensor e atuador

O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 em cristais de quartzo e desde então motivaram inúmeras investigações para o desenvolvimento de sistemas transdutores eletromecânico. O efeito consiste basicamente na conversão de energia mecânica em energia elétrica. Posteriormente, por análises termodinâmicas, foi observada a existência do efeito piezoelétrico inverso que consiste no aparecimento de uma deformação do material quando submetido a um campo elétrico. Por volta de 1947, foi descoberto que cerâmicas ferroelétricas de titanato de bário, polarizadas, apresentavam o efeito piezoelétrico, marcando o início da geração das piezocerâmicas. Os estudos de soluções sólidas nos anos 50 resultaram na obtenção de cerâmicas de titanato zirconato de chumbo (PZT), que passaram a ser objeto de freqüentes investigações para a otimização de suas propriedades ou como motivação para o desenvolvimento de novos compostos cerâmicos. Na atualidade, materiais piezoelétricos são utilizados como elementos sensores e/ou atuadores em aplicações tecnológicas desde baixas freqüências até freqüências da ordem de 10^9 Hz. Nas freqüências baixas são adotados, principalmente, os materiais policristalinos (cerâmicos, polímeros ou compósitos) e nas altas freqüências os cristais e filmes finos. A Figura (4) apresenta um modelo de uma placa piezoelétrica retangular destacando as direções de deformações mecânicas e de polarização elétrica. Convencionalmente foram adotados para representar as direções de deformação e de aplicação de tensão elétrica os índices 1-1 para o comprimento, 2-2 para a largura e 3-3 para espessura da placa piezoelétrica (MALLIK, 2005, HAMPTON, 2006).

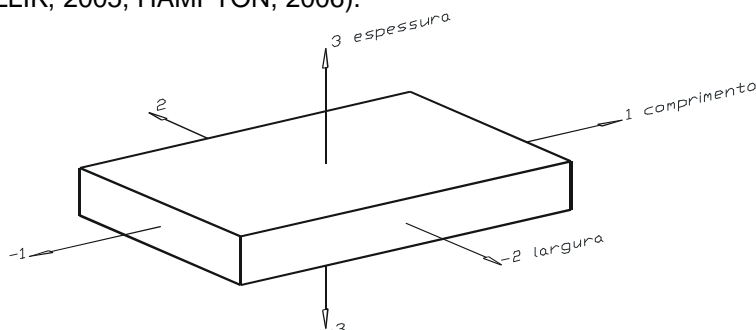


Figura 4. Direções de deformação e de polarização de uma placa piezoelétrica

Inicialmente foi pensado na utilização do PZT em conjunto com LMF para forma o atuador híbrido. Nesse caso, esse atuador híbrido, seria acoplado a uma estrutura de placa de alumínio que separaria dos ambientes ruidosos. Assim, seriam aplicadas ondas sonoras em um dos ambientes e atenuado no outro devido à aplicação de força do atuador híbrido. Essa atuação causaria redução do nível de ruído no ambiente posterior. Para conseguir bons resultados na pesquisa o estudo teve que ser dividido basicamente em duas etapas: na utilização do PZT e na utilização de LMF separadamente para posterior junção.

Para o estudo com a cerâmica piezoelétrica foi desenvolvido um sistema de viga mono engastada tendo um PZT com atuador e outro como sensor. O desenvolvimento desse sistema teve início na modelagem e simulação em um software de elementos finitos onde a viga de alumínio mono engastada foi submetida a vibração causada pela atuação de um PZT. A simulação inicialmente teve como objetivo determinar as dimensões da mesma. Para isso foi utilizada a análise modal. Para testar a metodologia proposta foi comparado com outro trabalho já em andamento que tem como objetivo de identificar falhas em estruturas flexíveis utilizando PZTs como emissor e receptor de ondas senoidais na estrutura.

Como mostrado na Fig. (5) o experimento consiste em uma viga de alumínio mono engastada em um bloco de aço, na qual é acoplada dois PZTs um como atuador provocando a onda a partir da variação de tensão proveniente do gerador de sinais e outro como sensor de vibração. Com auxílio de um osciloscópio digital e um sistema de aquisição de dados foram realizadas as leituras de tensões oriundas do PZT sensor.

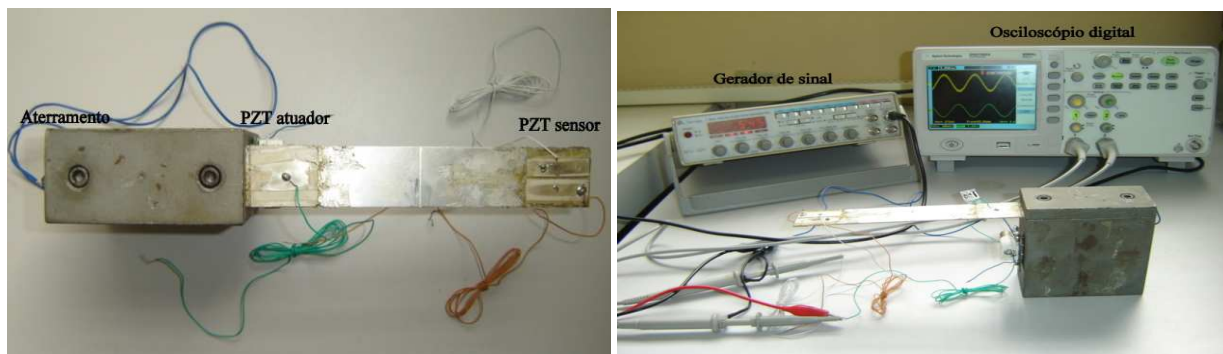


Figura 5. Estrutura da viga mono engastada e instrumentação utilizada

Para a aquisição das freqüências naturais de vibração dos primeiros modos da viga foi utilizado o ensaio de impacto. As freqüências naturais experimentais foram comparadas com os resultados simulados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Simulações

Inicialmente foi simulada a viga para determinação dimensional e obtenção das freqüências naturais de vibração. Assim a viga teve 169 mm de comprimento, 28 mm de largura e 1 mm de espessura. Um software de elementos finitos foi utilizado fazendo a análise modal da estrutura. A viga foi mono engastada garantindo a não existência de translação e rotação nos sentidos de x, y e z. O elemento de viga Beam63 foi utilizado para tal modelamento. A Figura (6) mostra três modos de vibração da viga com suas freqüências naturais associadas.

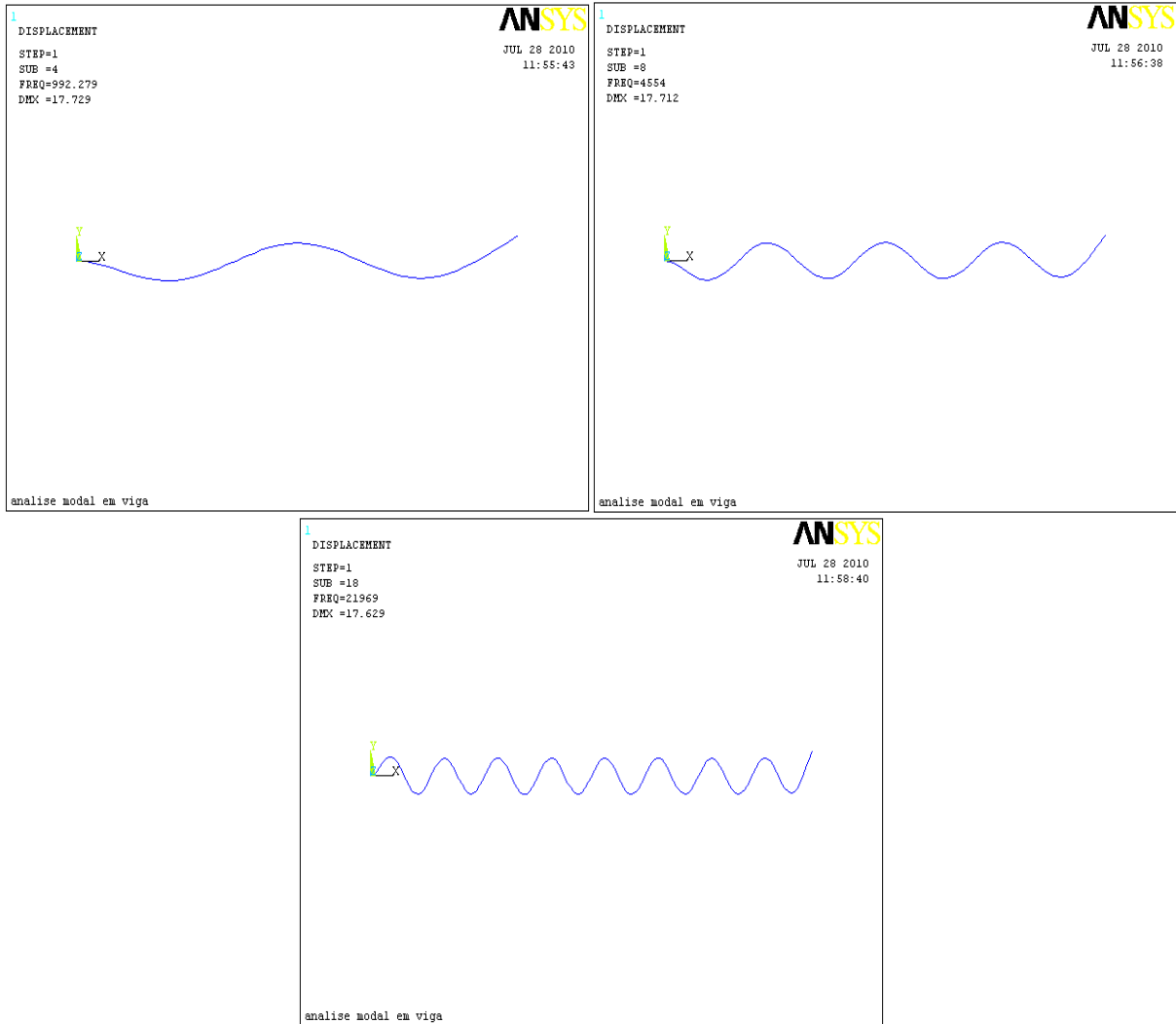


Figura 6. Modos de vibração da viga 4º modo - 992 Hz , 8º modo - 4554 Hz 18º modo - 21969 Hz

Procedimento Experimental

Uso de PZTs como sensores e atuadores

Para a obtenção da freqüência natural de primeiro modo da viga foi utilizado o teste de impacto sobre a viga. A Figura (7) mostra o sinal de impacto no domínio do tempo e no domínio da freqüência. Nesse caso foi possível verificar a freqüência natural do primeiro e do segundo modo.

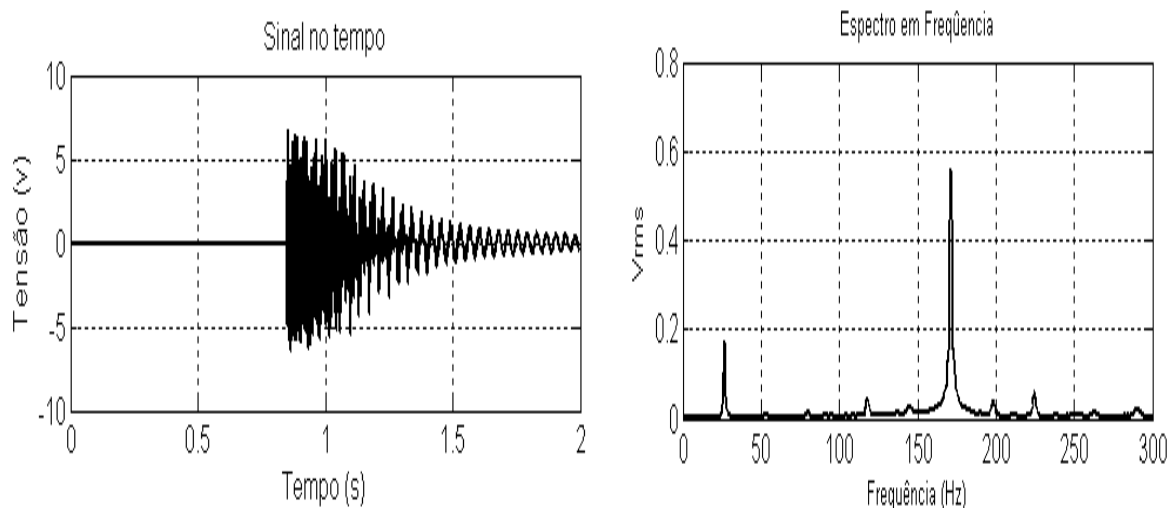


Figura 7. Sinal de vibração da viga no domínio do tempo e no domínio da frequência respectivamente.

Para comprovar a eficácia desta metodologia foi feito um comparativo entre as frequências naturais da viga com a introdução de defeito. Nesse caso, foi simulada também a viga com um defeito na sua posição central. Assim foram comparados os sinais de vibração da viga sem defeito e com defeito verificando a diferença de mudança das frequências naturais. A Figura (8) e a Tabela (1) mostram a aproximação das frequências teóricas obtidas através do software comparado com às frequências obtidas experimentalmente. Nesse caso, foram apresentados os modos de frequências mais evidentes.

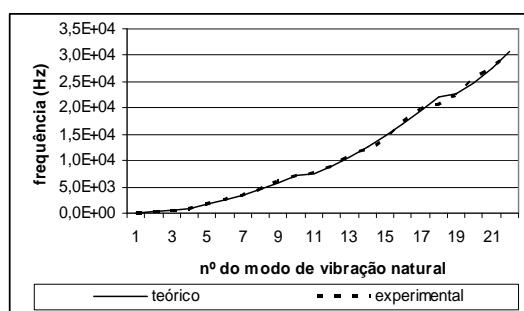


Figura 8. Frequências do modelo teórico e experimental sem defeito

Tabela 1. Variação de frequência sem e com defeito

	4º modo	8º modo	18º modo
Sem falha	976,90	4600,60	20732,60
Com falha	972,78	4591,00	20713,60
Variação de frequência	4,12	9,60	19,00

Concepção do atuador híbrido

Para o desenvolvimento do atuador híbrido propõe-se utilizar a propriedade termomecânica do disco (LMF) como atuador para aumentar a rigidez do sistema quando o mesmo for submetido à vibração proveniente de pressão sonora sobre um anteparo. O atuador contará com dois PZTs acoplados em uma das faces sendo um sensor e outro atuador. O atuador receberá um sinal através de um gerador de funções transmitindo a atuação para o disco em LMF. O sensor captará a resposta de vibração mecânica do disco de LMF enviando os dados para o PC. Um programa desenvolvido em LabView e MatLab receberá os dados e fará uma análise da resposta obtida. O disco quando aquecido a uma temperatura maior que a de transformação de fase irá se transformar para a fase austenita onde sua rigidez é superior a da fase martensita, fazendo com que a rigidez do sistema seja significativamente elevada. Esse efeito se aplicado a

uma superfície vibrante poderá minimizar o nível de vibração mecânica na mesma. Assim, esse atuador aplicado com um sistema de controle poderá ativamente reduzir o nível de vibração mecânica de uma estrutura que vibra por ocasião de pressão sonora. A Figura (9) apresenta a pastilha de LMF produzida no LaMMEA/UAEM/CCT/UFCG.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho de pesquisa foram basicamente preliminares. A montagem e aplicação do atuador híbrido continuará a ser executada no LEMMI e LaMMEA para novas publicações. Entretanto os resultados simulados e experimentais comprovaram a eficácia da aplicação do PZT como elemento atuador e sensor sobre a estrutura de viga. A obtenção da liga com memória de forma e sua caracterização (disco) obtiveram resultados bastante satisfatório para a utilização proposta.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica;
A UAEM/CCT/UFCG pelo apoio com a estrutura do laboratório;
LaMMEA/DEM/UFCG pelos materiais e equipamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAUDRY, M.; MICHEAU, P.; BERRY, A. Decentralized harmonic active vibration control of a flexible plate using piezoelectric actuator-sensor pairs. *Acoustical Society of America*, v. 119, p. 262-277, 2005.
- CARNEAL, J. P.; FULLER, C. R. An analytical and experimental investigation of active structural acoustic control of noise transmission through double panel systems. *Journal of Sound and Vibration*, v. 273, p. 749–771, Abr, 2004.
- DE SOUTO, C. R. Controle ativo de vibração em placas usando atuadores piezoelétricos - aplicação a atenuação de ruídos em ambientes fechados. Tese de D. Sc., UFPB, Brasil, 2008.
- GARDONIO, P.; BIANCHI, E.; ELLIOTT, S. J. Smart panel with multiple decentralized units for the control of sound transmission. Part II: design of the decentralized control units. *Journal of Sound and Vibration*, v. 274, pp. 193–213, Maio, 2003.
- GARDONIO, P.; BIANCHI, E.; ELLIOTT, S. J. Smart panels with velocity feedback control systems using triangularly shaped strain actuators. *Acoustical Society of America*, v. 117, pp. 2046 – 2064, Dec, 2004.
- KAIZUKA, T.; TANAKA, N. Active boundary control of a rectangular plate using smart modal sensors. *Smart Materials and Structures*, v. 15, pp. 1395-1403, Jul, 2006.
- MALLIK N.; RAY, M. C. Exact solutions for the analysis of piezoelectric fiber reinforced composites as distributed actuators for smart composite plates. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, v. 2, pp. 81-97, 2005.
- OLIVEIRA, L. P. R. Controle ativo de ruído em veículos e seu impacto na qualidade sonora. Tese de D. Sc., USP, São Paulo, Brasil, 2007.
- OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1998.
- PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. An integrated health monitoring technique using structural impedance sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 11, pp. 448 – 455, Jun, 2000.
- SILVA, S. A. Controle ativo de vibração e ruído em estruturas flexíveis utilizando atuadores piezoelétricos. Tese de D. Sc., UFPB, Brasil, 1998.
- SRINIVASAN, A. V. MCFARLAND, D. M. *Smart Structures: Analysis and Design*. Cambridge University Press. Cambridge, UK