



**VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil**  
*August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil*

## CONTROLE DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS UTILIZANDO PROPRIEDADES DAS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

**Alberdan Santiago de Aquino, alberdan@ifpb.edu.br<sup>1</sup>**  
**Jader Moraes Borges, jader@dem.ufcg.edu.br<sup>2</sup>**  
**Marcos Antônio da Silva Irmão, marcos.silva@univasf.edu.br<sup>3</sup>**  
**Antônio Almeida Silva, almeida@dem.ufcg.edu.br**

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB

<sup>2</sup>Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

<sup>3</sup>Universidade Federal Vale do São Francisco - UNIVASF

**Resumo:** *As ligas com memória de forma ou Shape Memory Alloy (SMA) são materiais que ao receber uma deformação mecânica são capazes de retomar às dimensões originais por meio de um aumento de temperatura específico. É possível encontrar ligas com memória de forma a base de Níquel, Cobre ou Ferro. Utilizando-se destas propriedades, estas ligas são aplicadas em diversos setores como a indústria aeroespacial, automotiva, biomédica e exploração de petróleo. Dentro destas aplicações estão àquelas referentes ao controle de vibrações, sejam elas em estruturas ou em máquinas. Neste contexto, são comparados resultados numéricos e experimentais de um sistema com um grau de liberdade, composto de uma massa apoiada em três molas helicoidais, sendo uma delas confeccionada com fio à base de Níquel-Titânio. Dentre os resultados, o trabalho mostrou que foi possível controlar as amplitudes de vibração do sistema com excitação forçada, através da mudança de sua frequência natural por meio da alteração da temperatura da mola helicoidal de SMA.*

**Palavras-chave:** *Memória de forma, vibração, controle*

### 1. INTRODUÇÃO

Ligas com memória de forma (SMA) são ligas metálicas que apresentam transformações de fases bem definidas quando submetidas a um ciclo térmico adequado. Isto resulta em um comportamento único, pois quando o material é deformado por meio de um carregamento mecânico, a forma original do material é recuperada quando o mesmo é submetido a um aquecimento específico. Esta mudança de forma pode acontecer apenas no aquecimento (Single Memory Effect) ou ocorrer mudança de forma tanto no aquecimento como resfriamento do material (Two Way Shape Memory Effect). Este comportamento não é encontrado nos materiais mais comumente utilizados na engenharia. Desta forma, pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de descrever melhor seu comportamento bem como onde e como podem ser aplicados.

Dentre as diversas formas de utilização dos materiais com memória de forma, o controle de vibrações em estruturas é um dos mais estudados (Lagoudas, 2008). Este controle de vibrações se baseia principalmente na alteração da rigidez estrutural ou do sistema vibratório (Choi, 2000; Holdhusen, 2000; Tao, 2006).

A utilização de molas helicoidais de SMA para reduzir níveis de vibração, pode apresentar resultados diversos, desejáveis ou não. Na utilização de molas com fios de SMA delgados, a carga térmica de ativação/desativação é baixa apresentando um tempo de resposta pequeno, podendo ser satisfatório. No entanto, fios muito finos limitam as forças de atuação do SMA. Se a solução para o problema anterior é o aumento do diâmetro do fio, isso irá resultar em uma maior exigência da carga térmica de ativação, para manter o mesmo tempo de resposta. Diante deste quadro, uma possível solução é a utilização do SMA aliado com outros materiais. Lau (2002) e Reis *et al*(2010), observaram o comportamento de uma viga composta de resina de epóxi com fios de SMA, com o objetivo de controlar vibrações.

O presente trabalho, dividido em três partes, mostra os resultados de simulação teórica e experimental de um sistema massa-mola composto de duas molas helicoidais de aço e uma de SMA montadas em paralelo. A primeira consiste de uma caracterização teórico-experimental das propriedades de uma mola helicoidal confeccionada com fios de Níquel-Titânio (SMA). Em seguida são verificados os resultados simulados de um sistema massa-mola onde o elemento de rigidez do sistema apresenta o comportamento termomecânico obtido na primeira parte. E finalmente na terceira parte são comparados os resultados simulados com os resultados obtidos em um sistema massa-mola real.

## 2. MOLAS HELICOIDAIS COM MEMÓRIA DE FORMA

A rigidez de uma mola helicoidal depende de parâmetros como geometria e do módulo de elasticidade do material envolvido na fabricação. No caso de materiais com memória de forma, Khajepour *et al*(1998) mostraram que o módulo de elasticidade do SMA depende das frações de martensita e austenita, tendo sido verificado que o módulo de elasticidade dos materiais com memória de forma pode aumentar em até três vezes com o aumento da temperatura (Srinivassan, 2001).

Um modelo matemático que descreve o comportamento da mudança de estado martensítico para austenítico (Ikuta *et al*, 1991) é apresentado na Eq.(1). É possível então fazer uma relação entre a rigidez e a temperatura que se encontra uma mola de SMA:

$$\xi = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{6,2}{A_F - A_S} \cdot \left(T - \frac{A_F + A_S}{2}\right)\right]} \quad (1)$$

Onde :

$\xi$ : é a fração de martensita da liga;  
 $A_F$ : é a temperatura final da fase austenítica;  
 $A_S$ : é a temperatura de início da fase austenítica;  
 $M_F$ : é a temperatura final da fase martensítica;  
 $M_S$ : é a temperatura de início da fase martensítica;  
 $T$ : Temperatura da mola.

No estado completamente martensítico ( $\xi=1$ ), a rigidez da mola apresenta um valor mínimo, que será denotado por  $k_{min}$ . Esta fase ocorre em temperaturas inferiores a  $A_S$ , tendo em vista que a estrutura interna do material nesta faixa de temperatura fornece um módulo de elasticidade mínimo.

Para o estado completamente austenítico ( $\xi=0$ ), a rigidez da mola apresenta um valor máximo, que será denotado por  $k_{max}$ . Esta fase ocorre em temperaturas acima de  $A_F$ , o que resulta em um módulo de elasticidade máximo. Percebe-se então que a rigidez do material se comporta de maneira inversa à fração de martensita, o que leva à Eq. (2):

$$k_{sma} = k_{min} + \left( (k_{max} - k_{min}) - \frac{(k_{max} - k_{min})}{1 + e^{\left[\frac{6,2}{A_F - A_S} \cdot \left(T - \frac{A_F + A_S}{2}\right)\right]}} \right) \quad (2)$$

Ou ainda:

$$k_{sma} = k_{min} + \frac{e^z \cdot \Delta k}{1 + e^z} \quad (3)$$

Onde:

$$\Delta k = k_{max} - k_{min} \quad e \quad z = \frac{6,2}{A_F - A_S} \cdot \left(T - \frac{A_F + A_S}{2}\right) \quad (4)$$

Para comprovação da Eq. (3), foi necessária a fabricação de uma mola helicoidal com 12 mm de diâmetro e 9 espiras ativas. O material empregado foi um fio de Níquel-Titânio (50%) com 2,59 mm de diâmetro (Fig. 1), liga esta identificada pelo fabricante como sendo *Alloy M* (Memory-Metalle GmbH©).



Figura 1 – Mola de SMA

A mola foi submetida a um ensaio para determinação da rigidez em função da temperatura. Para isso foi usada uma máquina universal de ensaios da marca Instron®, onde na Fig. (2) é mostrada a mola montada no equipamento para o ensaio de compressão. Em cada ensaio a mola foi comprimida em 10 mm, onde o equipamento registrava a força em Newtons para cada deslocamento em milímetros da mola. A exatidão do instrumento é de 0,001.

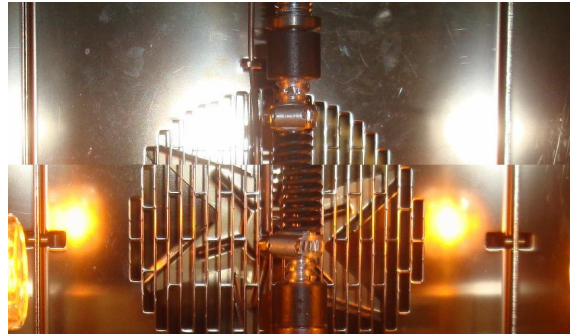


Figura 2 – Mola de SMA montada para ensaio de compressão

No teste de rigidez, a mola foi submetida a 10 ciclos de compressão em cada temperatura de medição. A temperatura inicial do teste foi de 20 °C, com diferença de 5 °C entre cada temperatura verificada. Os resultados obtidos neste teste estão apresentados na Tab. (1).

Tabela 1 – Rigidez da mola SMA

Temperatura (°C)	Rigidez (N/m)
20	3465,2
25	3466,1
30	3452,7
35	3428,5
40	3422,9
45	3286,8
50	3270,7
55	3353,7
60	3590,4
65	4689,0
70	5639,1
75	5662,2
80	5763,3
85	5765,1

Também foi necessário um teste de resistividade para determinação das temperaturas de transformação de fase. O ensaio consiste basicamente de um monitoramento de resistência elétrica e temperatura. A liga com memória de forma é utilizada como carga de um circuito elétrico alimentado por uma fonte de corrente constante. Esse conjunto elétrico foi mergulhado em um fluido onde se podia acompanhar a variação de temperatura com utilização de um termopar, conforme ilustrado na Fig. 3.

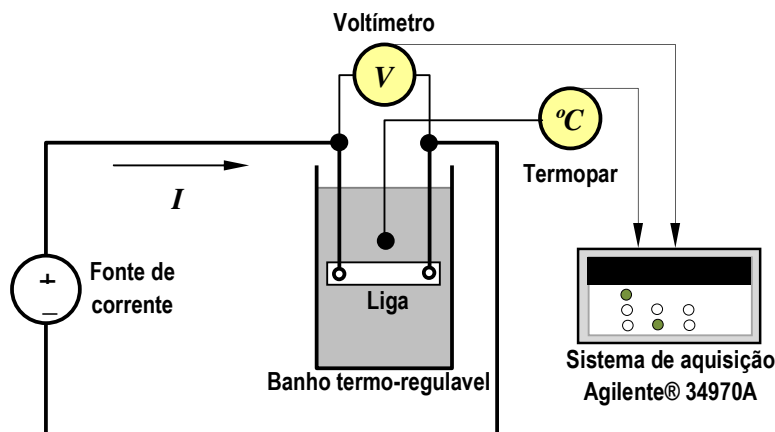


Figura 3 – Esquema do teste de resistividade

A variação de temperatura da liga provoca na mesma uma variação da resistência elétrica e consequentemente uma variação de tensão, que pode ser determinada através da lei de Ohm (Resistência = Tensão / Corrente). O resultado do teste de resistividade mostrado na Fig. (4) indica que as temperaturas nas fases martensita inicial e final são respectivamente,  $M_s=42^\circ\text{C}$  e  $M_f=23^\circ\text{C}$ . E para austenita inicial e final,  $A_s=57^\circ\text{C}$  e  $A_f=75^\circ\text{C}$ , respectivamente. Este comportamento da resistividade elétrica em função da temperatura para a liga Ni-Ti é conhecido como mostrado por Otsuka e Wayman (1998).

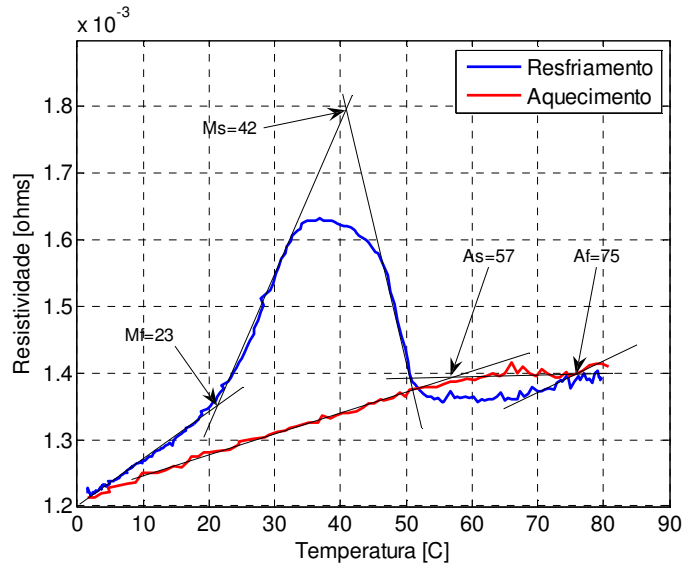


Figura 4 – Teste de resistividade

Depois de aplicados os dados experimentais do teste de rigidez (Tab.1) e de resistividade (Fig. 4) na Eq.(2), foi obtido o resultado gráfico mostrado na Fig. (5). Os valores de rigidez máxima e mínima neste intervalo de temperatura foram respectivamente iguais a  $k_{max}=5765 \text{ N/m}$  ( $85^\circ\text{C}$ ) e  $k_{min}=3270 \text{ N/m}$  ( $50^\circ\text{C}$ ).

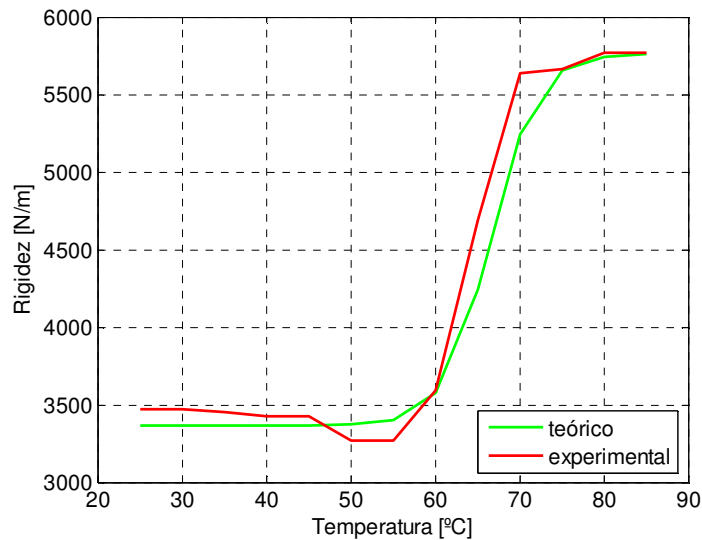


Figura 5 – Rigidez da mola de SMA

Com este resultado (Fig. 5), foi possível projetar um sistema massa-mola-amortecedor, onde a mudança de temperatura altera a rigidez do sistema, e consequentemente, a frequência natural do mesmo. Utilizando-se dos resultados da mola em experimento, essa condição de mudança da frequência natural só é válida para o intervalo de temperatura compreendido entre  $50^\circ\text{C}$  e  $80^\circ\text{C}$ .

Considere um sistema primário amortecido de 1 grau de liberdade (1 gdl), com massa  $m$ , amortecimento  $c$  e rigidez  $k_{eq}$ , sujeito à excitação por força harmônica de frequência  $\omega$ . A rigidez do sistema é composta por três molas, sendo duas molas de aço ( $k_1$  e  $k_2$ ) e uma mola de Níquel-Titânio ( $k_{sma}$ ), com propriedades de memória de forma. O sistema descrito é ilustrado na Fig. (6).

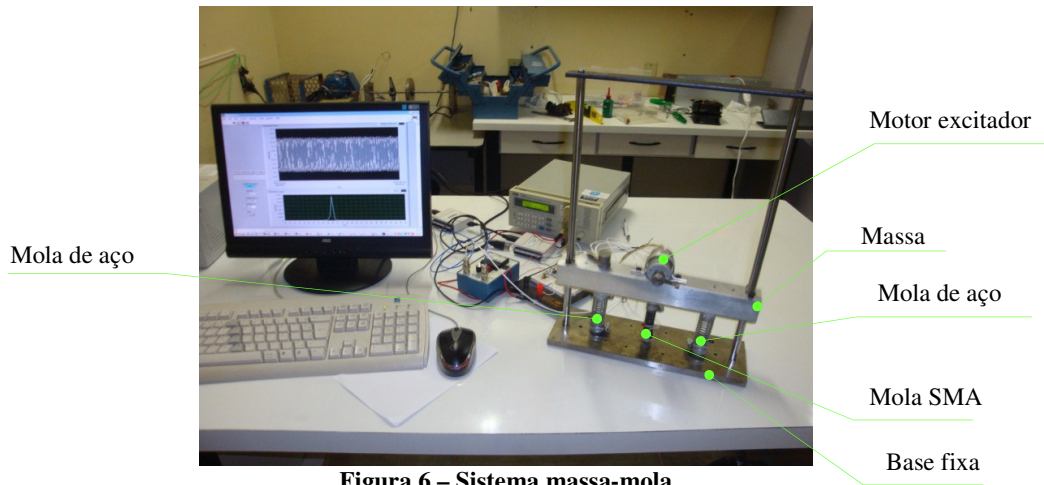


Figura 6 – Sistema massa-mola

A Equação (6) descreve o sistema em questão, e o elemento  $k_{sma}$  é obtido na Eq. (2):

$$m.\ddot{x} + c\dot{x} + (k_1 + k_2 + k_{sma}).x = F_0.e^{i.\omega.t} \quad (5)$$

Neste caso,  $F_0$  é a força de excitação do sistema provocada pela massa desbalanceada  $m_d$ . Esta força de excitação é definida como:

$$F_0 = m_d.d.\omega^2 \quad (6)$$

Onde:

$d$  é o valor de desbalanceamento da massa  $m_d$ ;

$\omega$  é a velocidade angular.

Os deslocamentos da massa ao longo do tempo, são obtidos a partir da Eq.(7)

$$x(t) = X_0.e^{i.\omega.t} \quad (7)$$

Onde  $X_0$  é o módulo da amplitude dado por:

$$X_0 = \frac{F_0}{\left( k_1 + k_2 + k_{\min} + \frac{(k_{\max} - k_{\min}).e^{\left[ \frac{6,2}{A_f - A_s} \left( T - \frac{A_f + A_s}{2} \right) \right]}}{1 + e^{\left[ \frac{6,2}{A_f - A_s} \left( T - \frac{A_f + A_s}{2} \right) \right]}} \right) - m.\omega^2 + i.\omega.c} \quad (8)$$

### 3. RESULTADOS

Para verificação do comportamento de uma mola helicoidal com propriedades de memória de forma em um sistema com um grau de liberdade, foi montado um experimento conforme mostrado na Fig. (6). A partir deste sistema físico, foram obtidos os seguintes dados experimentais que são apresentados na Tab. (2). Estes dados vão ser adotados nas simulações numéricas e comparar com os resultados com o modelo físico real.

Tabela 2 – Dados experimentais do sistema

Parâmetros	Fase martensítica	Fase austenítica
Temperatura – $A$ [°C]	50	80
Massa - $m$ [Kg]	0,514	
Amortecimento – $c$ [N.m/s]	4,2191	3,3248
Rigidez da mola de aço – $k_j$ [N/m]	1948	
Rigidez da mola de aço – $k_2$ [N/m]	1945	
Rigidez da mola de SMA – $k_{SMA}$ [N/m]	3270	5700
Desbalanceamento – $d$ [m]	0,025	
Massa desbalanceada – $m_d$ [Kg]	0,0047	

A excitação do sistema foi realizada através da rotação de uma massa desbalanceada acoplada a um motor de corrente contínua. O motor foi alimentado com tensões que partiram de 0 a 24 Volts, que resultaram em frequências de excitação de 0 a 60 Hz. Um circuito eletrônico aliado com uma placa de comunicação de dados, comandaram a evolução das frequências de excitação. A temperatura da mola foi monitorada através de um termistor NTC, e a aceleração da massa  $m$  com um acelerômetro 350B04 da PCB Piezotronics <sup>TM</sup>. Para se obter os resultados de temperatura, aceleração e também o comando do motor foram utilizados uma placa de aquisição de dados USB6009 e o *software* Labview, ambos produtos da National Instruments®.

Os resultados gráficos em frequência foram obtidos a partir da inserção dos dados colhidos em um algoritmo no ambiente do Matlab®, algoritmo este responsável por integrar duplamente o sinal de aceleração.

Foram obtidas respostas em duas situações: a 50 °C no início da fase austenítica, e a 80 °C quando a estrutura da mola já é totalmente austenítica.

Observou-se que a 50 °C, as maiores amplitudes ocorreram em 18,7 Hz, valor este que corresponde à frequência natural do modelo teórico, conforme mostrado na Fig.(7-a).

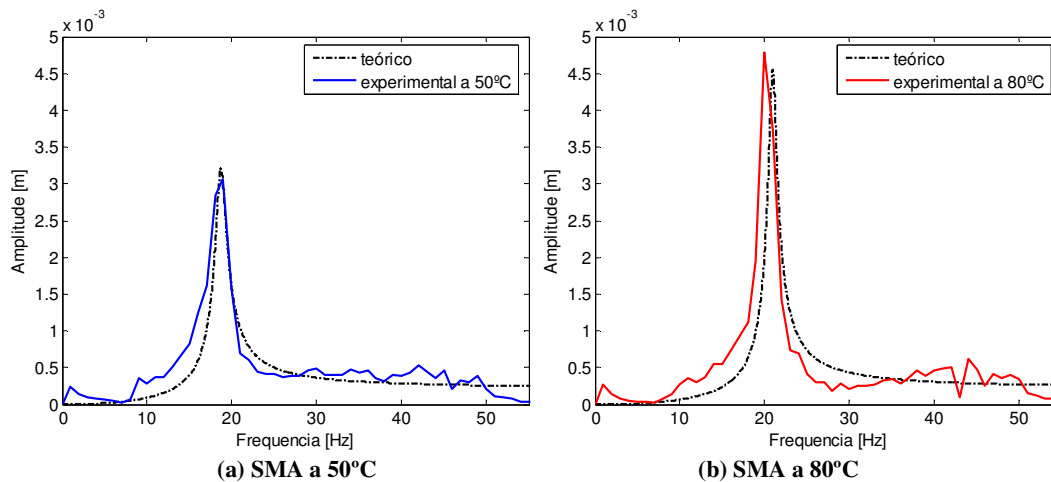


Figura 7 – Resposta em frequência do sistema

A mola SMA foi aquecida até 80 °C por meio de corrente elétrica, e conforme o modelo teórico, as maiores amplitudes ocorreram em 21,9 Hz (Fig. 7-b). Esta mudança da frequência natural de  $\omega_{n1}=18,7\text{Hz}$  para  $\omega_{n2}=21,9\text{Hz}$  é um resultado esperado tendo em vista que a rigidez das molas de aço associadas com a mola SMA leva a estes valores de frequência natural.

A Figura (8) mostra a curva de resposta em frequência experimental para as duas situações, ou seja, a 50 °C e 80 °C. Fica clara a mudança da frequência natural com o aquecimento da mola de SMA. Observa-se que mantendo uma frequência de excitação  $\omega_{n1}$  no sistema, seguido de um aquecimento do SMA à 80°C, a amplitude de vibração é reduzida em três vezes. Este resultado da variação do comportamento dinâmico com a associação de molas SMA comprova a tese de possível controle de amplitudes vibratórias de um sistema físico que necessite passar numa dada faixa de frequências críticas.

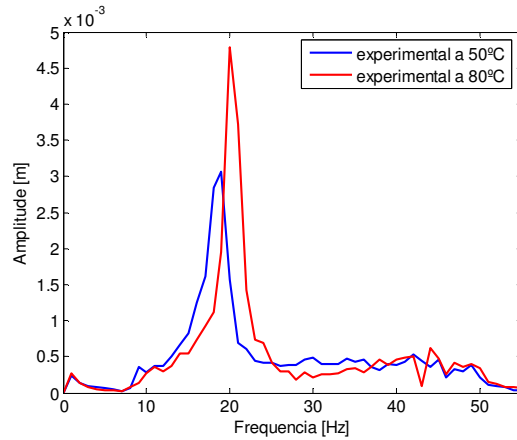


Figura 8 – Resposta em frequência do sistema

Uma outra situação avaliada, foi a substituição das molas de aço por molas de SMA com mesmo valor de rigidez a 50°C e 80 °C, ou seja, o sistema passa a ter 3 molas de SMA com características idênticas. Nesta nova configuração, a mudança de rigidez com o aumento de temperatura será mais evidenciada. A Figura (9) mostra os resultados simulados para este caso. É observado que a frequência natural muda de  $\omega_{n1}=21,73$  Hz para  $\omega_{n2}=27,39$  Hz. Fazendo a mesma análise da Fig.(8), a amplitude de vibração nesta configuração é reduzida em seis vezes.

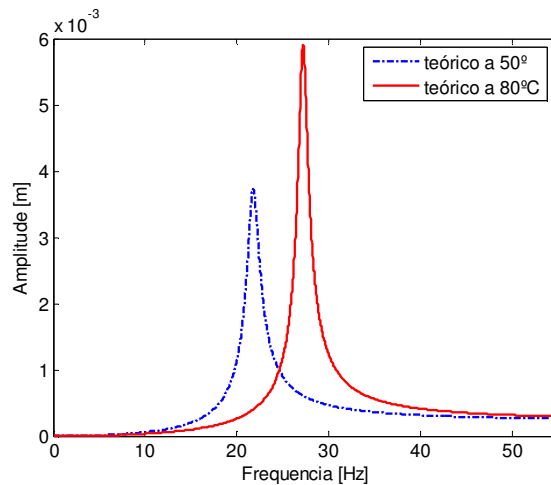


Figura 9 – Resposta em frequência do sistema com molas apenas de SMA

#### 4. CONCLUSÕES

Avaliando o sistema massa-mola-amortecedor, onde o elemento de rigidez apresenta propriedades dos materiais com memória de forma, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- O aumento de temperatura da mola de SMA compreendido entre as fases de austenita inicial e austenita final, provoca um aumento na frequência natural do sistema. Este aumento depende principalmente das temperaturas de transformação do SMA, e da associação deste componente com outros elementos de rigidez que o sistema possui. No experimento em questão, a frequência natural do sistema alterou de  $\omega_n=18,77$  Hz para  $\omega_n=21,79$  Hz. Isto significa que, se o sistema é posto para vibrar a 18,77 Hz quando a mola de SMA se encontra a 50°C, e em seguida for aplicado um aquecimento mantendo o mesmo valor de excitação (18,77Hz), as amplitudes de deslocamento do sistema irão reduzir substancialmente. O mesmo ocorre quando o sistema é posto para vibrar a 21,79 Hz e a mola de SMA se encontra a 80°C, e em seguida for aplicado um resfriamento mantendo o mesmo valor de excitação (21,79Hz), as amplitudes de deslocamento do sistema também irão reduzir. Conclui-se então que é possível aplicar controle de temperatura na mola de SMA com o intuito de reduzir níveis de vibração em sistemas massa-mola-amortecedor funcionando como absorvedores dinâmicos.



- A variação da rigidez do sistema utilizado no experimento é resultado da combinação de molas de aço com uma mola de SMA. Caso houvesse a substituição apenas das molas de aço por molas de SMA, a frequência natural do sistema alteraria de  $\omega_n=21,73$  Hz para  $\omega_n=27,39$ Hz. Conclui-se então que um sistema composto apenas de molas de SMA apresentará uma maior redução dos níveis de vibração, quando houver alteração de temperatura entre as fases de austenita inicial e final.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de financiamento CNPq, CAPES e FINEP, pois sem este aporte não seria possível a obtenção dos resultados.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amir Khajepour, Hamid Dehestani and Farid Golnaraghi, “**A new Shape Memory Alloy Rotary Actuator: Design and Modelling**”. International Symposium on Impact and Friction of Solids, Structures and Machines, 1998.
- Choi, S. B.; Hwang, J. H. “**Structural vibration control using shape memory actuators**” *J. Sound Vib.* **231** 1168–74, 2000.
- Gotthardt, R., Bidaux, J. R., 1998, “**Functional Materials Based On Polymer Matrix Composites With Embedded Shape Memory Alloy Fibers**”, *TMS Publications*, pp. 157-166, 1998.
- Holdhusen, Mark H.; Cunefare, Kenneth A. **Experimental Vibration Control of a Single-Degree of Freedom System Using a State-Switched Absorber**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. vol 19; pp 1435, 2008.
- Ikuta, K.; Hirose, S.; Tsukamoto, M.. “**Mathematical Model and Experimental Verification of Shape Memory Alloy for Designing Microactuator**”, Proceedings of the IEEE MicroElectroMechanical Systems Conference, pp. 103-108, 1991.
- Lagoudas, D. C. **Shape memory alloy: modeling and engineering applications**. N. York, Springer Science+Business Media. 435p. 2008.
- Lau, K. “**Vibration characteristics of SMA composite beams with different boundary conditions**”, *Materials & Design*, Vol. 23, pp. 741-749, 2002.
- Liang, C.; Rogers, C. A. **One-Dimensional Thermomechanical Constitutive Relations for Shape Memory Materials**, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, n. 1, pp. 207-234. 1990.
- Otsuka, K.; Wayman, C. M. **Shape Memory Materials**, Cambridge University Press, First Edition pp. 68-69. 1998.
- Reis, R. P. Batista; Souto, C. R.; Araújo, Carlos José; Silva, Antonio Almeida; Silva, Edson Paulo. “**Vibration attenuation in an epoxy smart composite beam with embedded NiTi shape memory wires**”, *Materials Science Forum* Vol. 643 pp 7-13.(2010).
- Srinivassan, A. V.; Mcfarland, D. M. **Smart Structures – Analysis and Design**. Cambridge University Press, 2001.
- Tao, Tao; Frampton, Kenneth D. **Experiments on distributed active vibration control of a simply supported beam**. *Smart Materials and Structures*. Vol.15; pp 1858–1862, 2006.
- Velázquez, R.; Pissaloux, E.. **VA Comparison of Controllers for Improving the Time Response of NiTi Wires**, Proceedings of the 9th IEEE Africon Conference, pp. 103-108, 2009.



## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

### CONTROL OF MECHANICALS VIBRATIONS USING THE PROPERTIES SHAPE MEMORY ALLOYS

**Alberdan Santiago de Aquino, alberdan@ifpb.edu.br<sup>1</sup>**

**Jader Moraes Borges, jader@dem.ufcg.edu.br<sup>2</sup>**

**Marcos Antônio da Silva Irmão, marcos.silva@univasf.edu.br<sup>3</sup>**

**Antônio Almeida Silva, almeida@dem.ufcg.edu.br**

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB

<sup>2</sup>Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

<sup>3</sup>Universidade Federal Vale do São Francisco - UNIVASF

**Abstract:** *Shape memory alloys (SMA) are materials that after a plastic deformation are able to return to original dimension by means of a temperature increase. There are SMA based on nickel, copper or iron. Based are their properties SMA are used in various sectors such as aerospace industries, automotive, biomedical and petroleum exploration. Within these applications are those related to vibration control, either in structures or machines. In this work, we compare numerical and experimental results of a system with one degree of freedom, consisting of a mass supported by three coil springs, one being made of NiTi SMA wire. Among the results, the study showed that it was possible to vary the amplitude of vibration of the system with forced excitation, increasing its natural frequency increasing the temperature of the SMA coil spring.*

**Keywords:** *Shape memory alloy, Vibration control*