

# DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DAS MOLAS COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA PARA ATUADORES INTELIGENTES <sup>1</sup>

C.A.N. Oliveira<sup>2</sup>  
C.H. Gonzalez<sup>3</sup>  
S. L. Urtiga Filho<sup>4</sup>  
N.F. Quadros<sup>5</sup>  
E.A.C. Pina<sup>6</sup>

## Resumo

Materiais inteligentes têm sido objeto de pesquisas em todas as partes do mundo. Os materiais mais utilizados em estruturas inteligentes são as ligas com memória de forma, as cerâmicas piezoelétricas, os materiais magneto-estrictivos e os fluidos eletro-reológicos. Este trabalho estuda o efeito memória de forma em molas da liga Cu-Zn-Al e tem por finalidade determinar os seguintes parâmetros característicos das molas: temperaturas de transformação, histerese térmica, deformações termoelástica e rendimento do efeito memória de forma. As molas foram produzidas a partir de fios comerciais de Cu-Zn-Al. As molas foram conformadas ao redor de parafusos comerciais com diâmetro, passo e tamanho semelhantes às características finais da mola com memória de forma. Posteriormente, o sistema foi submetido ao tratamento térmico de 850°C durante 10 minutos, seguido de resfriamento em água a 100°C. As molas foram submetidas ao ensaio de tração auxiliado por sistema de aquisição de dados, que possibilitam a obtenção das temperaturas de transformação a partir dos gráficos de deformação versus temperatura pelo método das tangentes. Nos testes foram aplicadas três tensões diferentes: 42, 63 e 84MPa. Verificou-se que a carga de 84MPa apresentou o melhor rendimento, mas não apresenta estabilidade das temperaturas críticas de transformação. Estes resultados são interpretados segundo os fenômenos físico-metalúrgicos que ocorrem durante a ciclagem térmica das molas.

**Palavras-chave:** Efeito memória de forma; Materiais inteligentes; Molas helicoidais.

## DETERMINATION OF SHAPE OF MEMORY SPRINGS PARAMETERS FOR SMART ACTUATORS

### Abstract

Smart materials have been objective of intensive researches in the world. The more important smart materials are: the shape memory alloys, piezoelectric ceramic, magnetic-strictives materials and electro reologic fluids. This work studies Cu-Zn-Al shape memory alloy springs under traction stress. In this work was determined the parameters characteristic of the springs: temperatures transformation, thermal histereses and rendimento of memory effect. The springs were produced from commercial wire of Cu-Zn-Al. The springs were manufactured around of commercial screws with diameter, step and similar size to the final characteristics of memory form spring. The system was submitted to thermal treatment at 850°C for 10 minutes, after quenched in water to 100°C. The springs were submitted traction test in apparatus specific. In the tests were applied 3 different tensions: 42, 63 and 84MPa. It was verified that the load of 84MPa represented a good result of rendimento, but no present stability of critical temperatures.

**Key words:** Shape memory effect; Smart materials; Helical springs.

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> Mestrando - Eng. Mec., Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária - CEP 50740-530 - Recife-PE, Brasil;

<sup>3</sup> Dr.Sci. INSA de Lyon, Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica

<sup>4</sup> Dr.UNICAMP São Paulo, Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica

<sup>5</sup> Dr.Sci. IPEN-USP São Paulo, Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica

<sup>6</sup> Mestrando - Eng. Mec., Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica

## 1 INTRODUÇÃO

Recentemente, os materiais inteligentes com memória de forma têm auxiliado muito no desenvolvimento tecnológico. Entre as principais aplicações tecnológicas, podemos citar: alarmes ativados eletricamente,<sup>(1)</sup> válvulas de controle termostático para uso industrial e doméstico, ajuste do nível do óleo em sistemas de lubrificação de trens por meio de molas com efeito memória de forma,<sup>(2)</sup> controladores de flaps de aviões permitindo miniaturização do sistema de acionamento, antenas flexíveis para celular, bem como aplicações na área médica,<sup>(3)</sup> onde temos por exemplo o endoscópio ativado por molas, entre outros.

Conforme este amplo campo de aplicações e o crescente uso de atuadores por molas com efeito memória de forma, deseja-se em aplicações técnicas que as temperaturas críticas de transformação sejam constantes.<sup>(4)</sup> Temos por objetivo neste trabalho investigar o comportamento termomecânico de molas confeccionadas com fios comerciais de Cu-ZN-Al com memória de forma, no intuito de definir os parâmetros: temperaturas de transformação, histerese térmica, constante elástica, deformações termoelásticas e o rendimento do efeito memória de forma durante os ciclos de educação (treinamento).

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

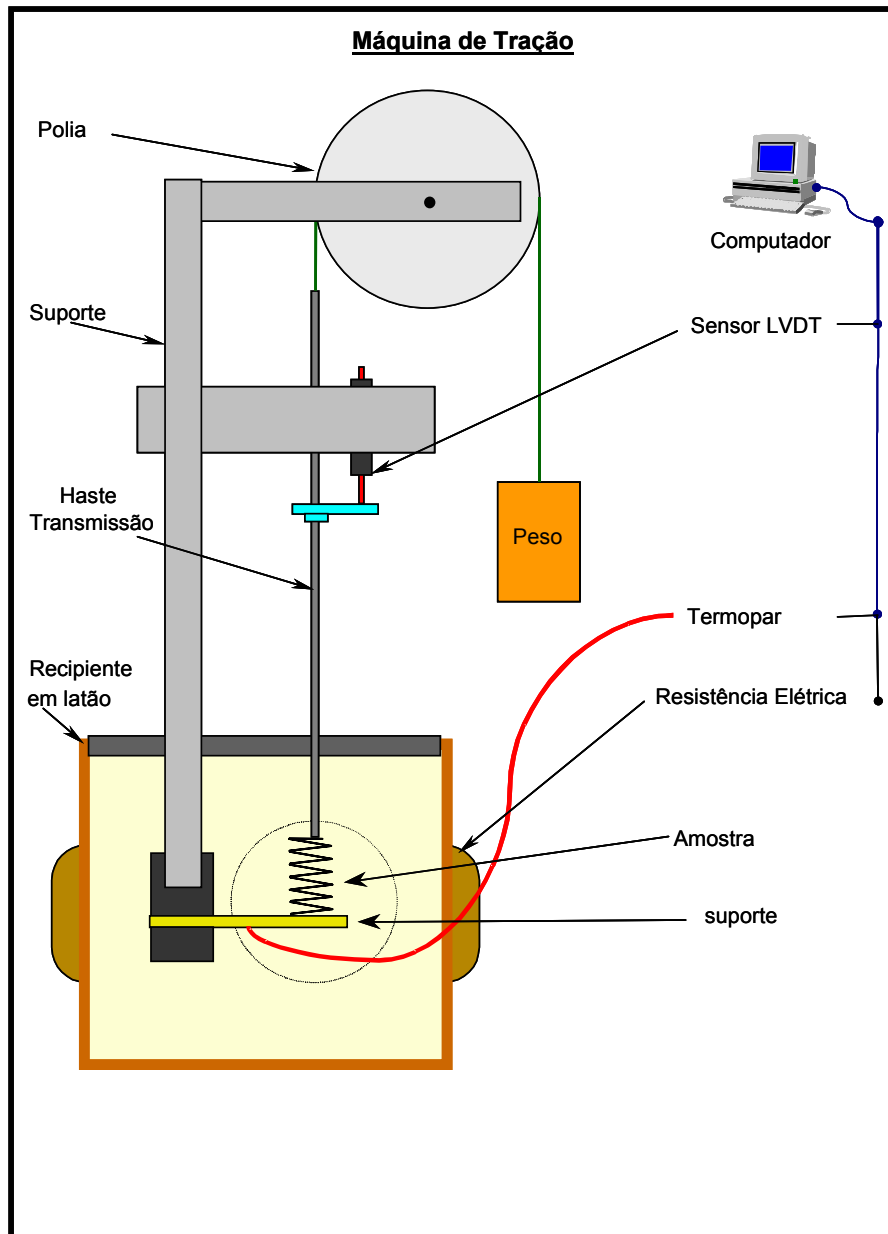
Os fios da liga Cu-Zn-Al de composição Cu-25,3%Zn-4,0%Al foram adquiridos na forma de fios comerciais com diâmetro de 0,9mm. Os fios foram conformados e tratados termicamente.

O método para confecção de molas depende do número de molas desejadas. No caso da confecção de poucas unidades podemos fazer a conformação dos fios ao redor de parafusos com diâmetro, passo e comprimento com as características semelhantes desejada para a mola. As extremidades devem ser fixadas para que o fio não solte da superfície do parafuso. O conjunto é submetido ao tratamento térmico de homogeneização a uma temperatura de 850°C por 10 minutos, seguido de um resfriamento em água a 100°C, com permanência de 10 minutos. Este tratamento térmico tem se mostrado eficiente para a obtenção das molas com as características pré-determinadas. As molas obtidas neste processo possuem as seguintes características: diâmetro externo de 4 mm, diâmetro interno de 3 mm, comprimento de 5 mm e 4 espiras.

O sistema desenvolvido para testar estas molas, ilustrado na Figura 1, consiste de uma máquina de ensaio de tração e um sistema de aquisição de dados capaz de obter a temperatura e a variação do comprimento da mola, possibilitando a verificação do efeito memória de forma. A mola é fixada a um suporte na extremidade inferior e na outra extremidade é ligada a haste de transmissão de carga. A carga é aplicada através de um sistema de polia. A deformação da mola é obtida com o auxílio de um sensor LVDT (linear variation displacement transducer).

As molas foram submetidas a diferentes cargas, que são capazes de provocar uma deformação e assim possibilitar o rearranjo das variantes de martensita contidas no material. Após a solicitação inicial da mola, ela é aquecida através de um forno de resistência até a temperatura de 140°C, e subsequente resfriada. As taxas de aquecimento e resfriamento foram de aproximadamente 7°C/min e 12°C/min, respectivamente. Este procedimento foi repetido durante 20 ciclos para cada carga aplicada, permitindo a observação das mudanças nas temperaturas críticas de transformação (As, Af, Ms, Mf), início e fim da transformação reversa e

início e fim da transformação direta ou martensítica, histerese térmica  $\left( Ht = \left( \frac{As + Af}{2} \right) - \left( \frac{Ms + Mf}{2} \right) = A_{50} - M_{50} \right)$  e do rendimento do efeito memória de forma, que foi obtido fazendo-se a diferença da deformação na fase martensítica daquela deformação encontrada na fase austenítica.  $EMF = L_m - L_a$ , sendo EMF o efeito memória de forma,  $L_m$  a deformação na fase martensítica e  $L_a$  a deformação na fase austenítica.



**Figura 1.** Representação esquemática da máquina de ensaio de tração para molas com efeito memória de forma.

as

As aplicações mais importantes das ligas com efeito memória de forma é como atuadores. A forma de mola helicoidal para estes atuadores é interessante devido a sua grande absorção de carga aliado com o efeito de recuperação de forma. As equações básicas, para o dimensionamento de molas helicoidais são mostradas abaixo:

- Tensão de Cisalhamento

$$\tau = K_w \cdot \frac{8FD}{\pi d^3} = K_w \cdot \frac{8FC}{\pi d^2} \quad (1)$$

onde:

$\tau$  - Tensão de cisalhamento no material da Mola (Kgf/cm<sup>2</sup>);  
 F - Carga axial atuante (Kgf);  
 D - Diâmetro médio da mola (cm);  
 C - Índice de Curvatura = D/d;  
 d - Diâmetro do arame (cm);  
 Kw - Fator de Wahl, onde.

$$K_w = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0,615}{C}$$

(2)

- Deflexão da mola

$$\delta = \frac{8FD^3 n}{d^4 G} = \frac{8FC^3 n}{dG} \quad (3)$$

onde:

$\delta$  - Deflexão ou flecha (cm);  
 F - Carga axial atuante (Kgf);  
 D - Diâmetro médio da mola (cm);  
 n - Número de espiras ativas;  
 d - Diâmetro do arame (cm);  
 G - Modulo de elasticidade transversal do material (Kgf/cm<sup>2</sup>);

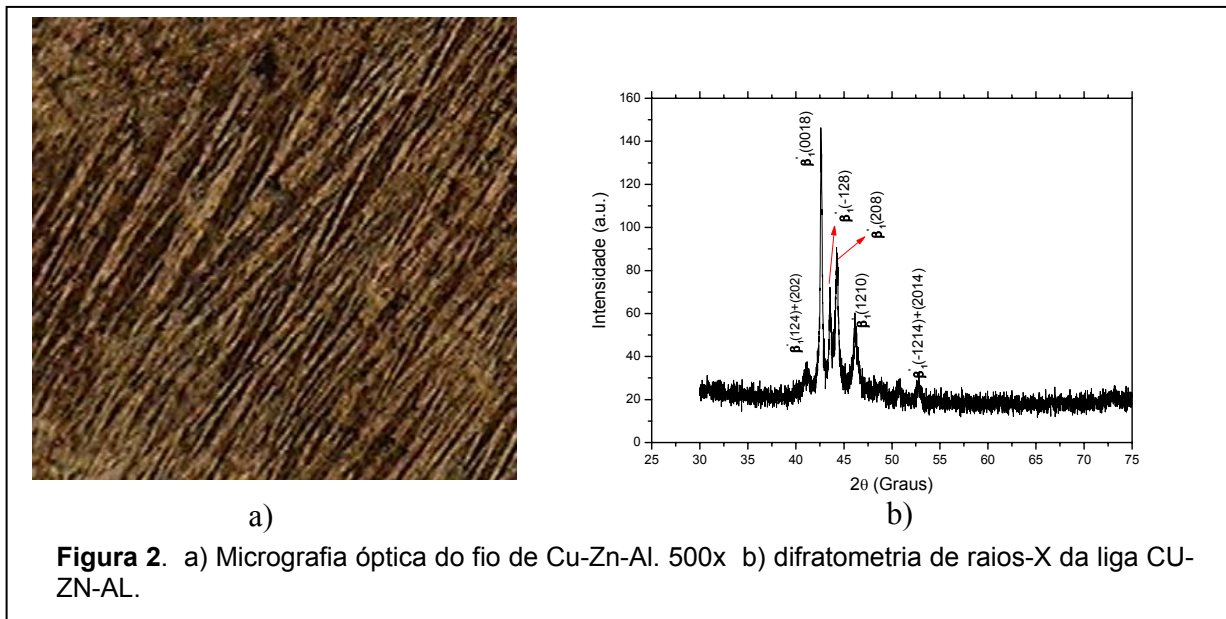
A microestrutura dos fios de Cu-Zn-Al foi observada por microscopia óptica com luz polarizada e contraste de Normanski e a estrutura cristalina foi determinada por difração de raios-X.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Caracterização dos Fios

A Figura 2.a apresenta a micrografia dos fios da liga Cu-Zn-Al, que nos permite verificar que a microestrutura é característica da fase martensítica pela presença das agulhas de auto-acomodação na superfície do material.

A difração mostrada na Figura 2.b indica que o fio de Cu-Zn-Al, após o tratamento térmico esta completamente na fase martensita e possui estrutura 18R ( $\beta'$ 1).

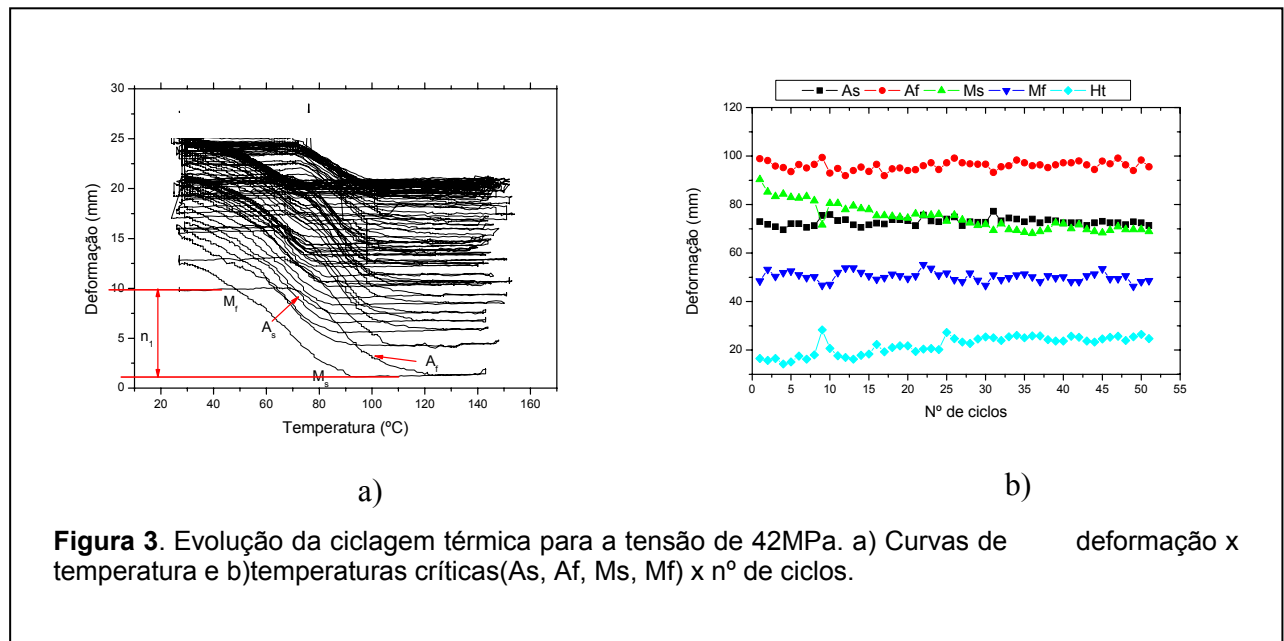


#### 3.2 Ciclagem Térmica sob Tração a Carga Constante

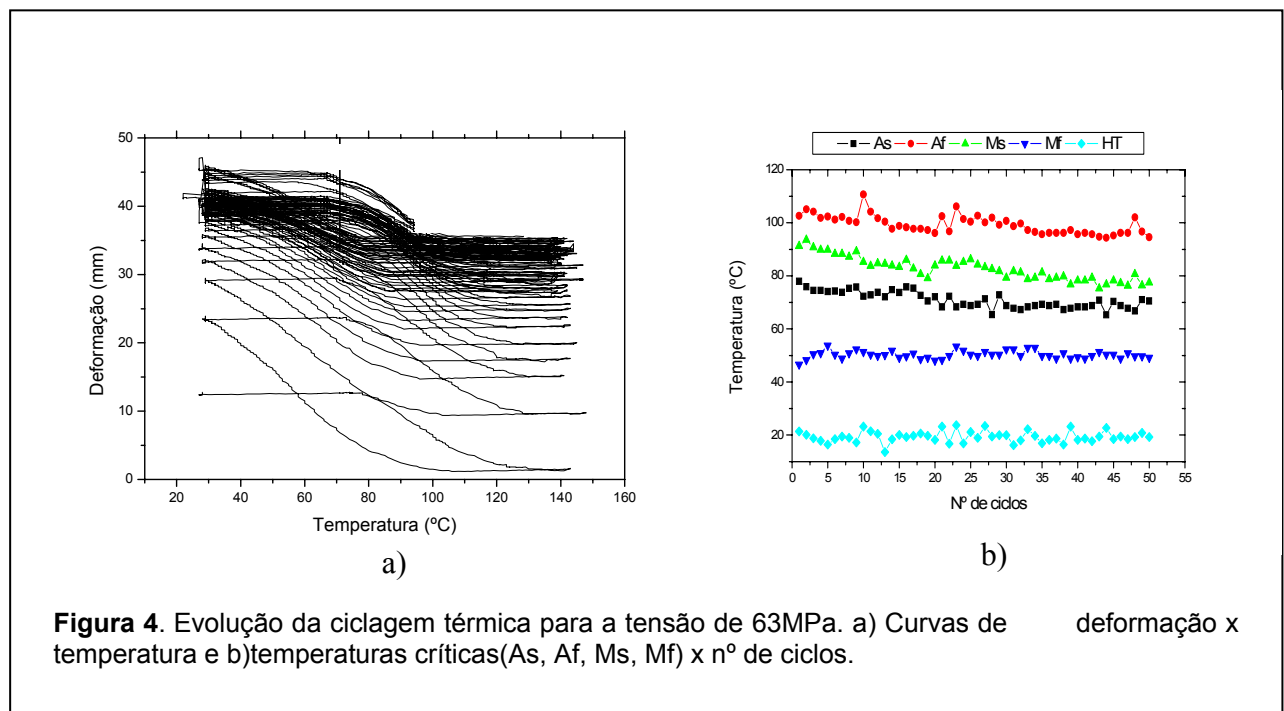
As Figuras 3, 4 e 5 apresentam a evolução das curvas deformação versus temperatura e das temperaturas críticas versus nº de ciclos durante a ciclagem térmica das molas submetidas as tensões de 42, 63 e 84MPa, respectivamente. Durante a ciclagem verifica-se que há uma evolução dos laços de histerese, onde ocorrem variações da deformação termoelástica, deslocamento dos laços e das temperaturas de transformação. Para a tensão de 42MPa observamos que a temperatura  $M_s$  foi de 90°C e a histerese térmica ( $H_t$ ) foi de 16°C e os laços se deslocaram de 15 mm ao final do 50º ciclo, com deformação termoplástica de 3 mm.

A diminuição da deformação é atribuída ao processo de reorientação das variantes de martensita. Durante este processo, algumas variantes tornam-se preferenciais em relação ao sentido da aplicação da carga.<sup>(5)</sup> O deslocamento dos laços de histerese ocorre devido à deformação plástica residual originada das tensões aplicadas que se acumula a cada ciclo térmico.<sup>(4)</sup> As evoluções das temperaturas críticas de transformação são apresentadas na Figura 3.b para a tensão de 42MPa. Estas variações ocorrem por vários fatores, dos quais podemos mencionar: rearranjo das variantes,<sup>(1)</sup> desbloqueio das interfaces austenita/martensita das lacunas de têmpera (as lacunas são eliminadas mais facilmente na fase austenítica  $T > A_f$ ),<sup>(6)</sup> reordenamento da fase austenítica e reconFiguração das discordâncias. Este último fator deve-se as discordâncias

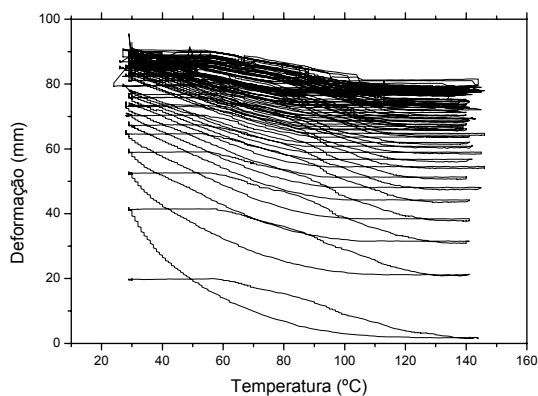
presentes na liga que durante a ciclagem se reorganizam em função das variantes ativas (preferenciais) e criam um campo de tensões internas que facilitam a transformação martensítica direta.<sup>(1)</sup> Este fato é evidenciado pela diminuição gradativa da temperatura Ms para todas as cargas (fig. 3.b, 4.b e 5.b). Para a carga de 42MPa, as temperaturas críticas começam a se estabilizar a partir do 25º ciclo, no qual os processos citados acima diminuem seus efeitos. Para a carga de 63MPa, verificamos para o primeiro ciclo as temperaturas Ms e Ht de 91°C e 21°C, respectivamente, a estabilização começa a ser observada no 30º ciclo e a deformação observada foi de 10 mm. Para a carga de 84MPa as temperaturas Ms e Ht foram respectivamente 95°C e 30°C, a estabilização se inicia a partir do 30º ciclo e a deformação observada foi de 20 mm.



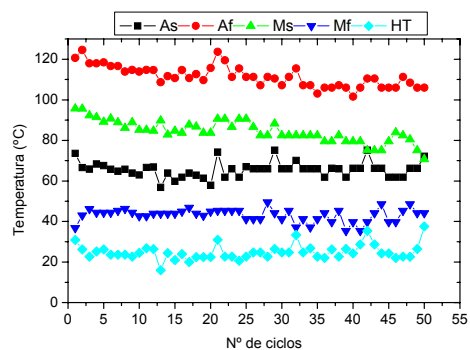
**Figura 3.** Evolução da ciclagem térmica para a tensão de 42MPa. a) Curvas de deformação x temperatura e b) temperaturas críticas ( $A_s$ ,  $A_f$ ,  $M_s$ ,  $M_f$ ) x n° de ciclos.



**Figura 4.** Evolução da ciclagem térmica para a tensão de 63MPa. a) Curvas de deformação x temperatura e b) temperaturas críticas ( $A_s$ ,  $A_f$ ,  $M_s$ ,  $M_f$ ) x n° de ciclos.

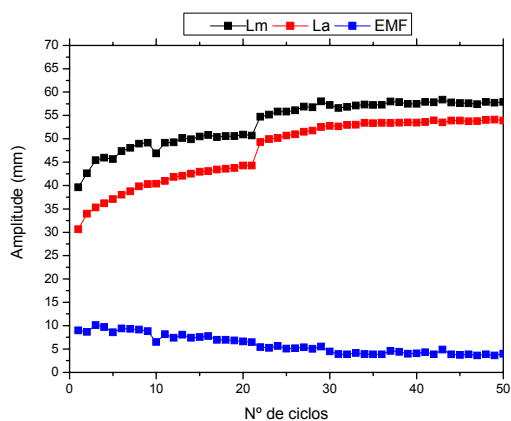


a)

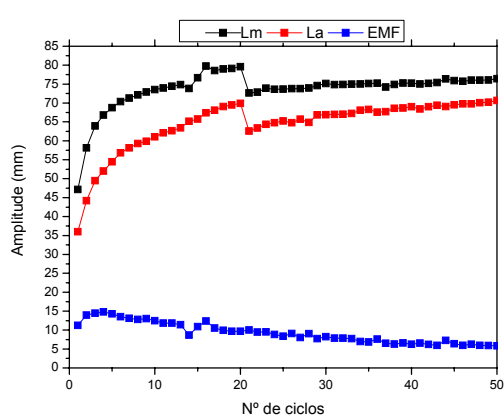


b)

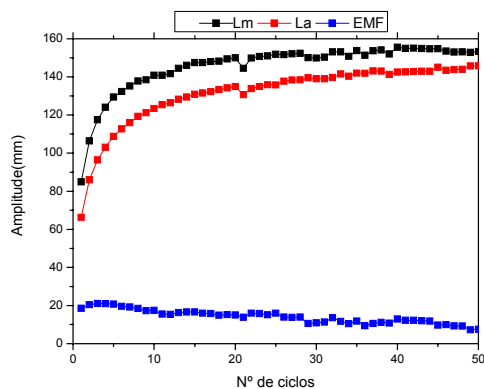
**Figura 5.** Evolução da ciclagem térmica para a tensão de 84MPa. a) Curvas de deformação x temperatura e b) temperaturas críticas(As, Af, Ms, Mf) x n° de ciclos.



a)



b)



c)

**Figura 6.** Efeito memória de forma obtido com a evolução da ciclagem térmica. a) para carga de 42MPa b) para carga de 63MPa c) para carga de 84MPa.

A Figura 6 esta apresentando a evolução do efeito memória de forma para as cargas de 42, 63 e 84MPa, onde podemos analisar a recuperação do efeito memória de forma que tende a se estabilizar conforme a reorientação das agulhas de martensita. A carga que apresentou melhor recuperação foi a de 84MPa com uma recuperação de 10 mm, sendo de 7 e 5 mm as recuperações para as cargas de 63 e 42MPa respectivamente. A melhor recuperação do efeito memória de forma para a carga de 84MPa se dá devido a se conseguir maiores energias para que ocorra o desbloqueio das interfaces austenita/martensita.

A temperatura  $M_s$ , a histerese térmica e o número de ciclos para estabilizar as variações das temperaturas críticas aumentam com a carga aplicada. Apesar de apresentar um melhor rendimento, a carga aplicada de maior valor na mola não apresenta uma tendência de estabilização após os 25 ciclos. Este fato pode estar relacionado com a deformação plástica residual que se acumula na mola provocando uma diminuição gradual do rendimento para esta carga. No caso das demais tensões aplicadas, uma estabilização dos parâmetros medidos ocorre a partir do 25º ciclo a imposição de menor e melhor condicionamento das propriedades do efeito memória de forma. Testes realizados com tensões superiores (105MPa) não apresentaram o efeito memória de forma. Neste caso com a colocação da carga as variantes foram reorientadas e em seguida o novo variante foi deformado plasticamente. Esta deformação permanente não pode ser recuperada apenas pela transformação inversa martensita.

#### **4 CONCLUSÕES**

Neste estudo, molas com efeito memória de forma foram submetidas a tração a carga constante, sendo determinadas as deformações termoplásticas, temperaturas críticas e evolução dos laços de histerese. Ficou evidenciado que as cargas aplicadas são capazes de facilitar a formação da fase martensítica devido a redução das barreiras de nucleação.

#### **Agradecimentos**

Agradecemos as agencias Brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.



## REFERÊNCIAS

- 1 Araújo, C. J., Silva, Edgard, Gonzalez, “Thermal alarm using a shape memory alloy helical spring”. COBEM 2001;
- 2 Kazuhiro Otsuka and Tomoyuki Kakeshita, Guest Editors, “Science and Technology of Shape-Memory Alloys: New Developments 1998”;
- 3 M.A. Savi, “Medical applications of shape memory alloys” – Brazilian Journal of Medical and Biological Research (2003) 36: 683-691;
- 4 Z. G. Wang, L.P. You, X. D. Feng, C.F.Zhang “Investigation on the two-way shape memory effect and alternating current electrothermal driving characteristics of TiNiCu shape memory alloy” Kluwer Academic Publishers, 2004.
- 5 Araújo, C. J., Gonzalez, “A Two-stage transformation in Cu-Zn-Al SMA wires”. COBEM 2005;
- 6 Van Humbeeck, J., Chandrasekaran, Delaey, L., 1989 – “The influence of post quenched ageing in the beta-phase on the transformation characteristics and the physical and mechanical properties of martensite in a Cu-Al-Ni shape memory alloys” – ISIJ International, vol. 29, p. 388-394.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 Gonzalez, C.H. “Obtenção e caracterização das ligas B-CuSn e B- CuZnSn com efeito memória de forma” - dissertação de mestrado, João Pessoa, 1993, p.4 – 17;
- 2 Claudeir, C.S. “Obtenção e caracterização das ligas Cu-Zn e Cu-Zn-Al com efeito memória de forma” - dissertação de mestrado, João Pessoa, 1994, p.4 – 22.