

## **CARACTERIZAÇÃO DO EFEITO MEMÓRIA DE FORMA EM MOLAS DESTINADAS A ATUADORES INTELIGENTES.**

C.A.N. Oliveira<sup>1</sup>, C.H. Gonzalez<sup>1</sup>, S. L.Urtiga. Filho<sup>1</sup>, N.F. Quadros<sup>1</sup>, C.J de Araújo<sup>2</sup>, M. G. Souza<sup>1</sup>, E.A.C. Pina<sup>1</sup>, J.O.S. Rocha<sup>1</sup>, J.C.S. Tavares<sup>1</sup>, J. J. Figueredo. Neto<sup>1</sup>.  
cano.oliveira@gmail.com.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária - CEP 50740-530 - Recife-PE, Brasil;

<sup>2</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Aprígio Veloso, 882, Caixa Postal: 10069, Campina Grande - PB, CEP 58109-970, Brasil.

### **RESUMO**

*O efeito memória de forma observado em ligas metálicas foi objeto de curiosidade e estudo de diversos grupos científicos. Atualmente com suas variadas aplicações na indústria Aeroespacial, robótica e mesmo medicina, seu interesse tem proporcionado o desenvolvimento de equipamentos utilizados como atuadores inteligentes. Este trabalho tem o objetivo de comparar os principais parâmetros como, diâmetro interno e externo, número de espiras e o efeito memória de forma em molas submetidas a ciclos de treinamento térmico.*

Palavras-chave: Efeito memória de forma, Atuadores inteligentes, Tratamento térmico, Molas helicoidais.

### **INTRODUÇÃO**

Os atuadores têm inúmeras aplicações na indústria e entre eles podemos citar os atuadores inteligentes com efeito memória de forma, que tem trazido grande desenvolvimento tecnológico devido a suas vastas aplicações nas grandes áreas da tecnologia, onde podemos citar usos na indústria aeroespacial, como é o caso de dos flaps de acionamento nas asas de aeronaves<sup>(1)</sup>, usados na medicina para fazer a

desobstrução das veias coronárias<sup>(2)</sup> bem como, acionadores de proteção contra descargas elétricas em equipamentos elétricos<sup>(3)</sup>, válvulas de controle termostático em residências, entre outros. O grande número de aplicações já observadas nos permitiu iniciar um estudo onde o objetivo é analisar o efeito memória de forma em molas submetidas a cargas de tração, obtendo desta forma o comportamento termomecânico dessas molas, quando submetidas a ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento.

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A confecção das molas foi feita utilizando fios da liga Cu-Zn-Al, adquiridos pelo laboratório de materiais inteligentes da Universidade Federal de Pernambuco junto a Universidade Federal de Campina Grande. Estes fios tinham composição igual a Cu-25,3%Zn-4,0%Al e diâmetro de 0,9 mm. As molas foram obtidas a partir da conformação mecânica<sup>(4)</sup> dos fios de Cobre ao redor de parafusos que possuíam características semelhantes às desejadas nas molas<sup>(1,4)</sup> como passo, número de espiras e diâmetro externo conforme se verifica na figura 1.

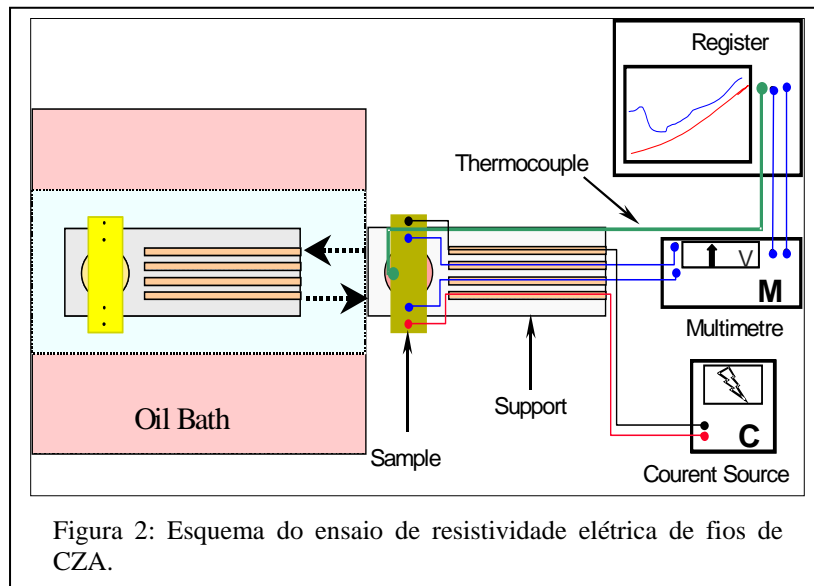


Figura 1: Molas de CZA conformadas ao redor de parafusos de 4,0 e 6,0 mm.

Após conformadas ao redor dos parafusos as molas foram submetidas a tratamento térmico a temperatura de 850°C durante 10 minutos seguido de têmpera em água a 100° com revenido de 10 minutos. As amostras obtidas por este tratamento se mostraram maleáveis devido a estrutura martensítica, com comprimento de 6,0 mm e

diâmetros iguais a 4,0 e 6,0 mm.

Após o tratamento térmico fizemos três ciclos térmico do ensaio de resistividade elétrica (RE), para se obter as temperaturas críticas de transformação do material sem carregamento, por meio do método de quatro pontos, onde tínhamos uma amostra de fio com aproximadamente 15,0 mm de comprimento, nesta amostra eram soldados quatro fios, sendo os dois fios das extremidades utilizados para se fazer a passagem de uma corrente de aproximadamente 3 A e os fios centrais eram utilizados para se captar a variação de corrente obtida pela indução do efeito memória de forma por meio variação de temperatura em banho térmico entre 25°C e 150°C, as taxas de aquecimento e resfriamento do banho eram respectivamente de 8°C/min e 4°C/min. O esquema para o ensaio de resistividade elétrica pode ser visualizado na figura 2.



Finalizado o ensaio de resistividade elétrica iniciamos os ensaios onde fazíamos a aplicação de cargas na mola, por meio de uma máquina de ensaio de tração a carga constante, desenvolvida no Laboratório de Materiais Inteligente da Universidade Federal de Pernambuco, o esquema desta máquina pode ser visualizado na figura 3. O sistema ilustrado na figura 3 consiste de uma máquina de ensaio de tração sob carga constante, banho térmico programável e um sistema de aquisição de dados capaz de obter a temperatura e a variação do comprimento da mola, possibilitando a determinação de parâmetros do efeito memória de forma.



Figura 3: Banho térmico programável com sistema de aquisição de dados.

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 dislocation transducer).

As molas com diâmetros de 4,0 e 6,0 mm foram submetidas a diferentes cargas, que são capazes de provocar uma deformação. Esta deformação consiste do somatório da deformação elástica da mola e a deformação provocada pelo rearranjo das variantes de martensita que é responsável pelo efeito memória de forma. As cargas aplicadas as molas foram de 42, 63 e 84MPa.

Após a solicitação inicial da mola, ela é aquecida através de um forno de resistência até a temperatura de 150°C, e subsequente resfriada até a temperatura de 25°C, as taxas de aquecimento e resfriamento foram de aproximadamente 8°C/min e 4°C/min respectivamente. Este procedimento foi repetido durante 50 ciclos para cada carga aplicada, permitindo a observação das mudanças nas temperaturas críticas de transformação ( $A_s$ ,  $A_f$ ,  $M_s$ ,  $M_f$ ), início e fim da transformação martensítica, direta e inversa, histerese térmica ( $H_t$ ) calculada pela equação (A) e do rendimento do efeito memória de forma, que foi obtido fazendo-se a

diferença entre a amplitude de alta temperatura e baixa temperatura de um ciclo térmico, como mostrado na equação (B). Após os 50 ciclos de treinamento obtivemos a mola apresentando o efeito memória de forma reversível(4,5,6,7)

$$\left( H_t = \left( \frac{A_s + A_f}{2} \right) - \left( \frac{M_s + M_f}{2} \right) = A_{50} - M_{50} \right) \quad (A)$$

$$EMF = B_t - A_t \quad (B)$$

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

- Tensão de Cisalhamento

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

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);

K<sub>w</sub> – Fator de Wahl, onde:

$$K_w = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0,615}{C} \quad (D)$$

- Deflexão da mola

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

onde:

$\delta$  - Deflexão ou flecha (cm);

F - Carga axial atuante (Kgf);

D - Diâmetro médio da mola (cm);

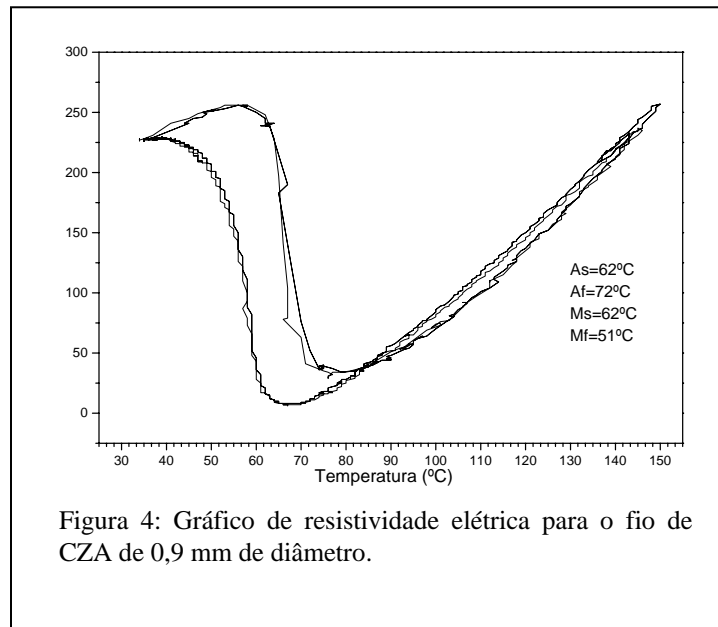
n – Número de espiras ativas;

d – Diâmetro do arame (cm);

G – Modulo de elasticidade transversal do material

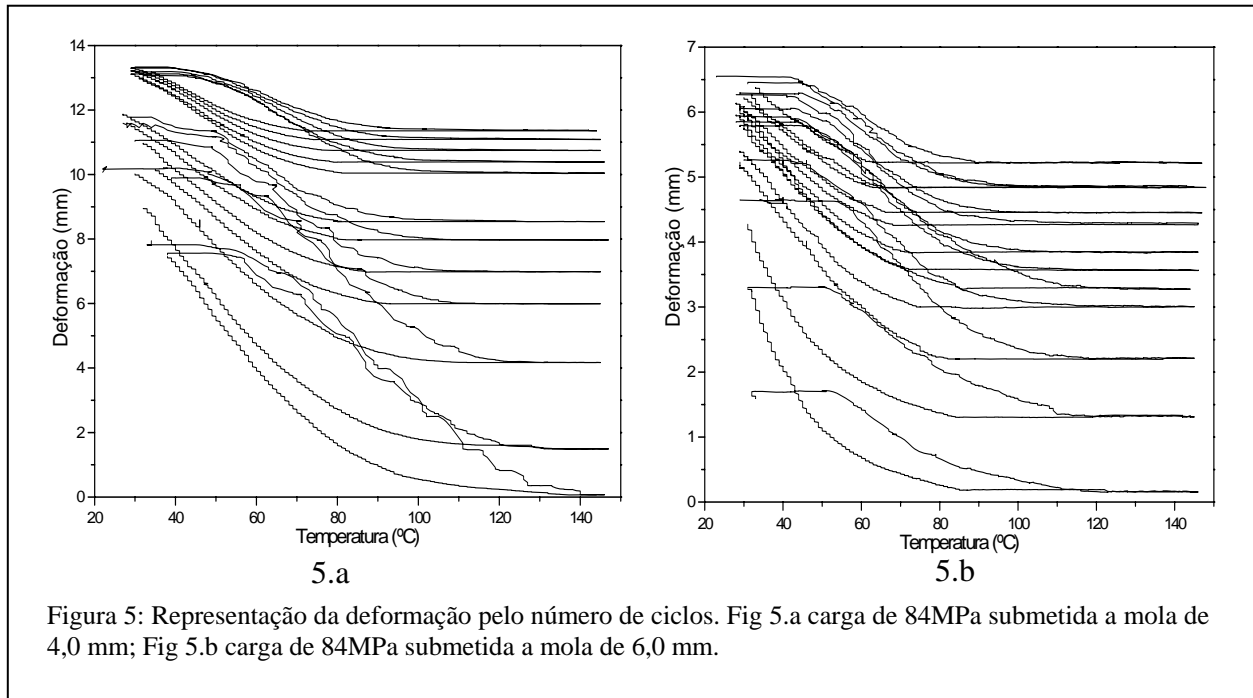
## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Pela análise do gráfico da figura 4, verificamos que os três ciclos feitos pelo método da resistividade elétrica resultaram em gráficos sobrepostos, o que nos permite dizer que as temperaturas de transformação foram muito próximas uma das outras para cada ciclo realizado. Essas temperaturas foram de 62°C e 51°C para as temperaturas  $M_s$  e  $M_f$  respectivamente e de 62°C e 72°C para as temperaturas  $A_s$  e  $A_f$  respectivamente.



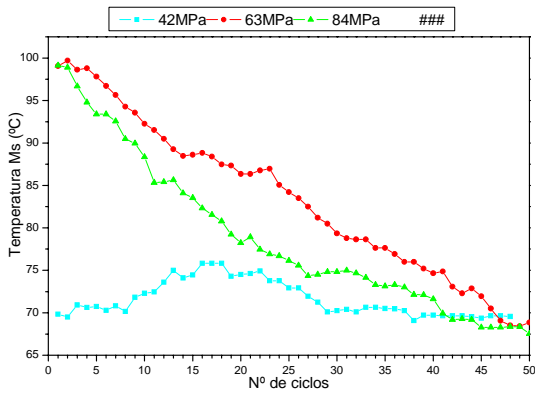
Apesar de termos aplicado as cargas de 42, 63 e 84 MPA nas molas de 4,0 e 6,0 mm, devido a tendência das curvas obtidas apresentamos nas figuras 5.a e 5.b apenas a representação os ciclos de número 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50, para as molas de 4,0 e 6,0 mm submetidas a carga de 84 MPa, onde obtemos as maiores deformações. Pela análise destas figuras podemos verificar que a mola de 4,0 mm apresentou uma deformação inicial igual a 7,5 mm e após o 50º ciclo uma deformação de 13,5 mm, já a mola de 6,0 mm apresentou uma deformação inicial igual a 1,7 mm e após o 50º ciclo deformação de 6,5 mm. Isso nos permite verificar que a mola de 4,0 mm apresentou maior facilidade de deformação com a evolução dos ciclos de

treinamento do que a mola de 6,0 mm. Podemos explicar esta diferença pela maior facilidade de reorientação das agulhas de martensita das molas de 4,0 mm que com a evolução dos ciclos se tornaram preferenciais diminuindo a densidade de discordâncias do material.

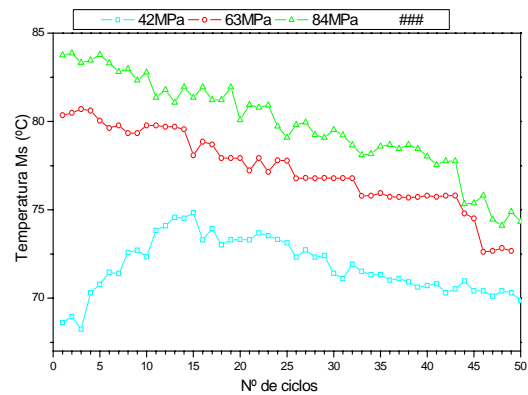


A figura 6 apresenta a evolução das temperaturas críticas de transformação para as cargas de 42, 63 e 84MPa submetidas às molas de 4,0 e 6,0 mm de diâmetro, onde fazemos referência às temperaturas de início da transformação martensítica ( $M_s$ ), início de transformação austenítica ( $A_s$ ) e histerese térmica ( $H_t$ ) para as molas referidas. As figuras 6.a e 6.b mostram a evolução das temperaturas  $M_s$ , onde podemos verificar que as cargas maiores necessitaram de maiores temperaturas  $M_s$  para reorientar as agulhas de martensita que devido a maior carga aplicada e também pela deformação plástica acumulada observada nas molas encontravam maior dificuldade para darem início a transformação direta<sup>(6)</sup>. Podemos observar também que para o primeiro ciclo as molas necessitaram, respectivamente de 69°C, 99°C e 99°C para as cargas de 42, 63 e 84 MPa aplicadas as molas de 4,0 e 68°C, 80°C e 83°C para as mesmas cargas aplicadas as molas de 6,0 mm. No final do último essa temperaturas foram de 69°C, 68°C e 68°C para as molas de 4,0 mm e 70°C, 72°C e 74°C para as molas de 6,0 mm

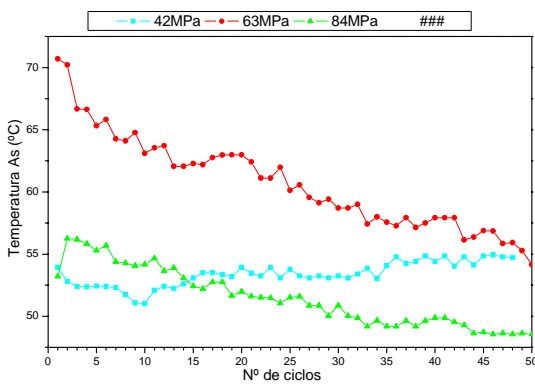
submetidas as cargas de 42, 63 e 84 MPa respectivamente.



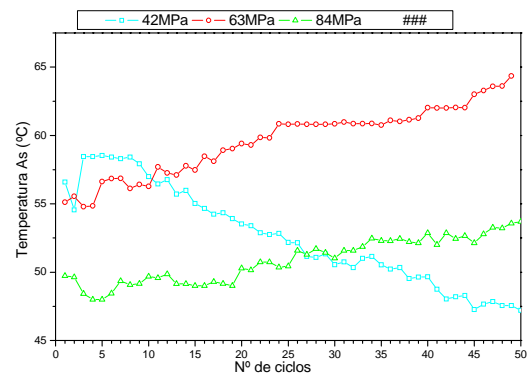
6.a



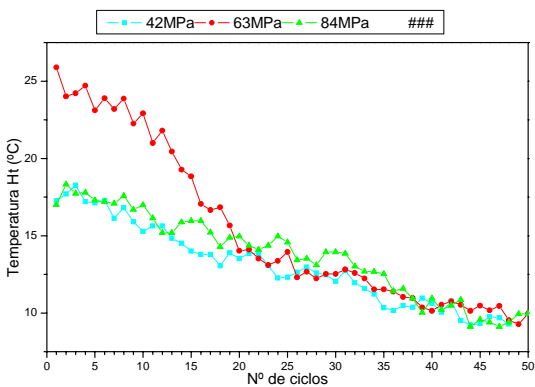
6.b



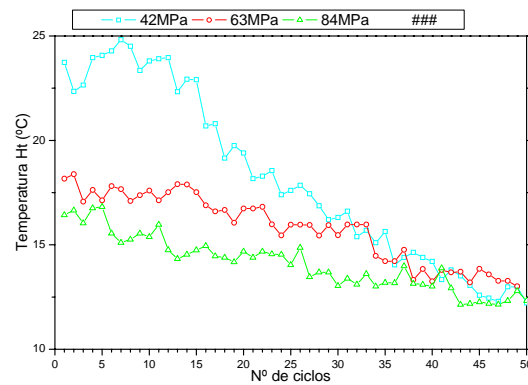
6.c



6.d



6.e



6.f

Figura 6: Gráfico das temperaturas críticas de transformação. As figuras 6.a e 6.b apresentam as temperaturas Ms para as molas de 4,0 e 6,0 mm respectivamente; As figuras 6.c e 6.d apresentam as temperaturas As para as molas de 4,0 e 6,0 mm e As figuras 6.e e 6.f apresentam as temperaturas Ht para as molas de 4,0 e 6,0 mm de diâmetro respectivamente.

As figuras 6.c e 6.d apresentam as curvas para da temperatura de início da transformação reversa ( $A_s$ ), estas figuras mostram que para as molas de 4,0 mm submetidas as cargas mais elevadas apresentou uma tendência de diminuição das temperaturas  $A_s$  e que as molas de 6,0 mm submetidas as cargas mais elevadas apresentaram uma tendência de diminuição desta temperatura.

A histerese térmica obtida pela diferença entre os de 50% da fração transformada da Austenita pelos 50% da fração transformada de martensita, ilustrado na equação (F), apresentam uma tendência de decréscimo com a evolução dos ciclos de treinamento para as molas de 4,0 e 6,0 mm.

$$H_t = A_{50} - M_{50} \quad (F)$$

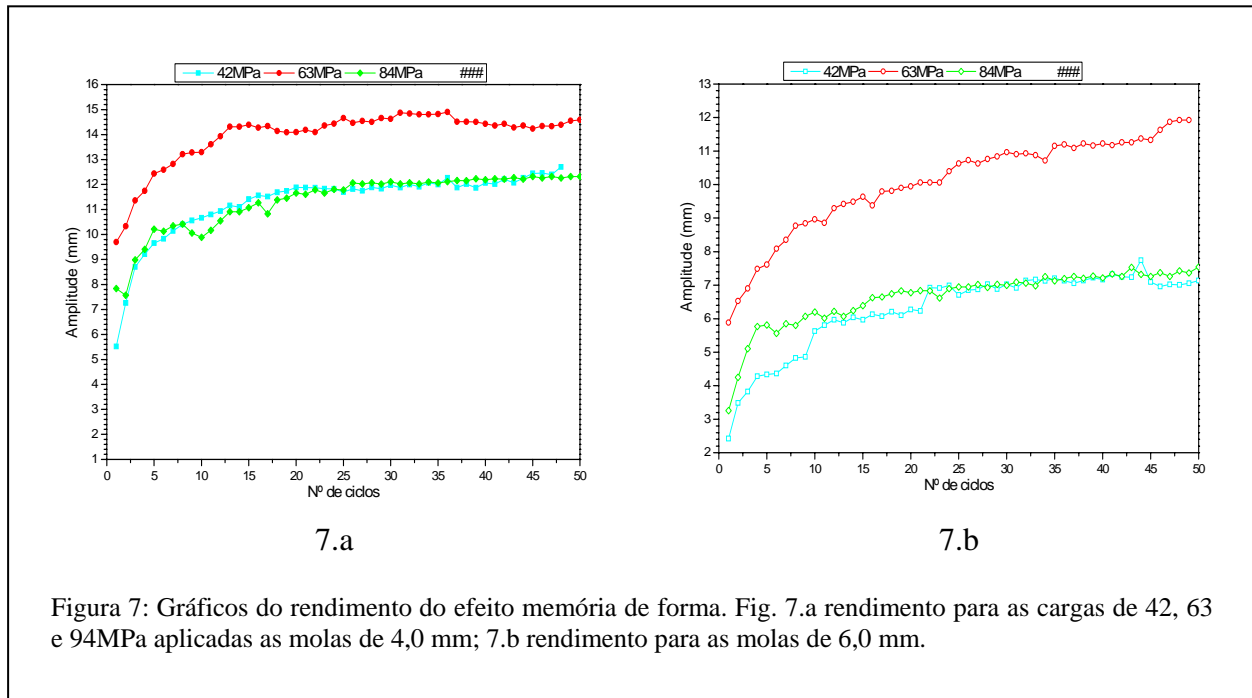
Pela tabela 1 verificamos a comparação das temperaturas obtidas pelo ensaio de resistividade elétrica com as temperaturas obtidas no 50º ciclo do ensaio de tração a carga constante, onde as temperaturas críticas já se encontravam estabilizadas nos permite confirmar que as temperaturas críticas de transformação são maiores com a aplicação das cargas de 42, 63 e 84MPa.

Temp. Críticas (°C)	RE	42 MPa		63 MPa		84 MPa	
		4,0 mm	6,0 mm	4,0 mm	6,0 mm	4,0 mm	6,0 mm
$A_s$	62	54	47	55	64	48	53
$A_f$	72	80	92	92	94	93	84
$M_s$	62	69	69	68	72	68	74
$M_f$	51	39	38	38	44	38	39
$H_t$	10	9	12	9	13	10	12

Tabela 1: Comparação das temperaturas críticas obtidas pelo ensaio de resistividade elétrica com as obtidas no 50º ciclo do ensaio de tração a carga constante.

A análise das figuras 7.a e 7.b nos mostram o rendimento do efeito memória de forma calculado pela já mencionada equação (B), a partir destes gráficos podemos verificar que as molas de 4,0 mm apresentaram maior rendimento que as molas de 6,0

mm, isto pode ser explicado principalmente pelo efeito gerado pela constante de elasticidade da mola, onde as molas de 4,0 mm apresentaram de acordo com a tabela 2 uma tendência de diminuição da constante elástica com o aumento da carga aplicada e também pelo efeito da diminuição da densidade de discordâncias no material, onde as agulhas de martensita se encontravam em direções preferenciais.



As molas de 6,0 mm também apresentaram conforme tabela 2 uma tendência de diminuição da constante elástica com o aumento da carga aplicada.

<b>Constante Elástica ( N/m)</b>			
<b>Mola 4,0 mm</b>			
	<b>1º ciclo</b>	<b>50º ciclo</b>	<b>140°C</b>
<b>k - 42 MPa</b>	<b>1,25</b>	<b>0,59</b>	<b>1,73</b>
<b>k - 63 MPa</b>	<b>0,81</b>	<b>0,8</b>	<b>1,65</b>
<b>k - 84 MPa</b>	<b>0,57</b>	<b>1,19</b>	<b>1,86</b>
<b>Mola 6,0 mm</b>			
	<b>1º ciclo</b>	<b>50º ciclo</b>	<b>140°C</b>
<b>k - 42 MPa</b>	<b>0,78</b>	<b>0,53</b>	<b>1,1</b>
<b>k - 63 MPa</b>	<b>0,53</b>	<b>0,55</b>	<b>0,96</b>
<b>k - 84 MPa</b>	<b>0,6</b>	<b>0,72</b>	<b>1,05</b>

Tabela 2: Relação das constantes elásticas das molas obtidas para o 1º e 50º ciclo e também para a fase matriz a 140°C, para as cargas de 42, 63 e 84MPa.

A análise feita a 140°C nos dá a constante elástica da mola na fase austenítica e podemos verificar pelos maiores valores obtidos para a constante elástica nesta fase, que se trata de uma fase bem mais resistente que a fase metaestável.

## CONCLUSÕES

Neste estudo molas com efeito memória de forma foram submetidas a tração a carga constante, para determinação das deformações termoplásticas, temperaturas críticas e evolução dos laços de histerese. Ficou evidenciado pelo estudo que as cargas aplicadas são capazes de facilitar a formação da fase martensítica devido à redução das barreiras de nucleação. As molas de menor diâmetro submetidas ao ensaio de tração a carga constante em banho térmico apresentaram menor resistência à deformação e também os melhores rendimentos para as mesmas cargas aplicadas, a resistência dessas molas auxilia na diminuição da deformação plástica das molas, permitindo que possamos visualizar o efeito memória de forma para as cargas consideradas. Os melhores rendimentos obtidos nas molas de 4,0 mm se justificam pela maior facilidade na reorientação da agulhas de martensita, bem como pela maior flexibilidade dessas molas em relação à carga aplicada.

## 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.

## BIBLIOGRAFIA

1. K. Otsuka, C. M. Wayman “ Shape Memory Materials” Cambridge University Press – 1998;
2. M.A. Savi, “Medical applications of shape memory alloys” Brazilian Journal of Medical and Biological Research (2003) 36: 683-691;

3. Queiroga, Sandro “Estudo de uma liga Cu-Al-Ni com memória de forma visando aplicações em sistema de proteção contra sobrecargas elétricas” – Dissertação de mestrado – Campina Grande 2006 – Pág. 38 – 66;
4. De Araújo, C. J., Silva, Edgard, Gonzalez, “Thermal alarm using a shape memory alloy helical spring”. COBEM 2001;
5. 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;
6. 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.
7. De Araújo, C. J. “Comportement cyclique de fils en alliage à mémoire de forme Ti-Ni-Cu : analyse electro-thermomécanique, dégradation et fatigue par cyclage thermique sous contrainte” – Tese de doutorado, França, 1999. p. 93 – 140.

## **CARACTERIZATION OF THE SHAPE MEMORY EFFECT ON SPRINGS TO SMART ACTUATORS.**

### **ABSTRACT**

The memory effect observed in metallic alloys have been curiosity object of study from several scientific groups. Now with their high number of applications in the Aerospace industry, robotics and even medicine, its interest has been providing the development of equipments used as smart actuators. This work has the objective of comparing the main parameters of helical springs used as actuators such as internal and external diameter, number of coils and the shape memory effect in springs submitted to thermal cycles of training.

keywords: Shape memory effect, Smart Actuators, Heat treatment, Helical springs.