

ESTUDO DAS PROPRIEDADES TERMOELÁSTICAS DE MOLAS COM MEMÓRIA DE FORMA DO SISTEMA Cu-Zn-Al ATUADORES INTELIGENTES COM MEMÓRIA DE FORMA¹

Carlos Augusto do Nascimento Oliveira²

Cezar Henrique Gonzalez³

Severino Leopoldino Urtiga Filho³

Ney Freitas de Quadros³

Carlos José de Araújo⁴

Resumo

A corrida tecnológica pela miniaturização, redução de custos e otimização de processos permite a intensificação dos estudos no desenvolvimento de materiais que possuem funções estruturais, como sensores e atuadores, ou seja, materiais multifuncionais. Alguns destes materiais são os fluidos eletro-magneto reológicos, alguns polímeros eletro-ativos e as ligas com memória de forma. Este trabalho tem por objetivo estudar molas confeccionadas com fios da liga de Cu-Zn-Al com memória de forma que poderão ser utilizadas como atuadores/sensores inteligentes. Este trabalho analisa o comportamento destas molas sob carga de tração constante e tem a finalidade de determinar às principais propriedades termoelásticas das molas: temperaturas críticas de transformação, deformação termoelástica e histerese térmica.

Palavras-chave: Atuadores inteligentes; Ligas com memória de forma de Cu-Zn-Al; Molas helicoidais; Propriedades termoelásticas.

STUDY OF THE THERMOELASTICS PROPERTIES OF SHAPE MEMORY HELICAL SPRINGS ON THE Cu-Zn-Al SYSTEM

Abstract

The technological race for miniaturization, reduction of costs and optimization of processes allows the intensification of studies in the discovery of multi-functional materials. Inside of the concept of those materials, there are electro and magneto-reologic fluids, some polymeric electro-actives and shape memory alloys. This work has objective to obtain springs from Cu-Zn-Al shape memory wires that can be used as smart actuators/sensors. This work analyzes the behavior of springs under traction load to determine the spring's thermoelastic properties: temperature, thermoelastic deformation and thermal hysteresis.

Key words: Smart materials; Cu-Zn-Al shape memory alloys; Helical springs; Thermoelastic properties.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Doutorando - Eng. Mec., Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia - Recife-PE, Brasil;

³ Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária - CEP 50740-530 - Recife-PE, Brasil;

⁴ Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Aprígio Veloso, 882, Caixa Postal: 10069, Campina Grande - PB, CEP 58109-970, Brasil

1 INTRODUÇÃO

As ligas com memória de forma são metais ou ligas que podem ser deformadas além do limite elástico (pseudo-plasticamente) e após a retirada da carga ou através de um simples aquecimento recuperam a sua forma inicial. Estes materiais estão sendo desenvolvidos para aplicações tecnológicas principalmente nas áreas eletromecânicas, biomédica, robótica e na indústria aeroespacial. Entre as aplicações desenvolvidas pode-se citar os alarmes termo-ativados,⁽¹⁾ reconstituição da anatomia humana, como por exemplo a construção das mãos robóticas,^(2,3) utilizações na desobstrução dos vasos e veias pela aplicação do filtro de Simon⁽⁴⁾ que é introduzido na corrente sanguínea na forma de um bastonete e muda de forma pelo aumento de temperatura ao entrar em contato com a corrente sanguínea, bem como aplicações cirúrgicas como o uso do endoscópio ativado por molas para tornar as cirurgias menos evasivas para o paciente, permitindo recuperação mais rápida.⁽⁵⁾ Na indústria aeroespacial é utilizada para redução da massa e miniaturização dos componentes das aeronaves, por exemplo, no caso da substituição dos sistemas hidráulicos de controle dos flaps das asas por um sistema empregando fios com memória de forma, que permite maior precisão e miniaturização do sistema.^(6,7,8)

O estudo das molas com memória de forma é interessante devido à sua elevada capacidade de elevação de carga, seu tamanho reduzido e maior deslocamento quando comparadas às utilizações de fios. A deformação termoelástica produzida em um fio com memória de forma é cerca 4 a 5%, no caso de uma mola helicoidal de mesmo comprimento do fio, o efeito memória é maior, pois o volume de material empregado para confeccionar a mola é maior. Ela pode atingir a mais de duas vezes seu comprimento e retornar a posição inicial.⁽⁹⁾

Neste trabalho são realizados ensaios de ciclagem térmica sob tensão constante de molas helicoidais produzidas com fios de memória de forma da liga Cu-Zn-Al. A partir dos resultados são obtidos os parâmetros relacionados a este tipo de sensores/atuadores inteligentes tais como: constantes elásticas das molas, temperaturas críticas de transformação, evolução do comportamento das molas durante a ciclagem térmica e o rendimento do efeito memória de forma. A obtenção desses parâmetros foi possível devido ao desenvolvimento de um dispositivo de ensaio de tração sob carga constante, onde é executada a ciclagem térmica que permite a caracterização termoelástica das molas, bem como observar o comportamento da deformação termoelástica durante a ciclagem térmica. Neste trabalho foram analisados 50 ciclos que constituem o treinamento ou educação do efeito memória de forma da mola. Durante a ciclagem de treinamento da mola ocorrem vários processos que são discutidos no presente trabalho.

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 0,9 mm. A obtenção das molas foi realizada por meio da conformação dos fios ao redor de um parafuso com diâmetro de 3,1 mm, passo de 1,1 mm e comprimento de 19,0 mm. Este conjunto foi submetido ao tratamento térmico de betatização que é constituído por homogeneização a uma temperatura de 850°C por 10 minutos, seguido de têmpera em água a 100°C e revenido de 10 minutos a 100°C. As molas obtidas neste processo possuem as seguintes características: diâmetro externo de 4,0 mm, diâmetro interno de 3,1 mm, comprimento de 5,0 mm com 4 espiras ativas.

Os fios de Cu-Zn-Al foram caracterizados por microscopia ótica. A preparação metalográfica consistiu no embutimento de amostras a frio, lixamento em máquinas politrizes, utilizando lixas com granulometria de 400, 600, 1000 e 1200 mesh. O polimento foi realizado com o auxílio de pano metalográfico e pasta de diamante de 3, 1 e $\frac{1}{4}$ μm . O ataque químico foi realizado durante 5 minutos com solução de nital (álcool etílico com 20% de ácido nítrico), seguido de secagem por convecção forçada.

A calorimetria diferencial de varredura foi utilizada para caracterizar as temperaturas críticas da liga sem a aplicação de cargas. Neste ensaio os fios foram submetidos a ciclos de aquecimento e resfriamento com intervalo de temperaturas entre 0 e 180°C, a uma taxa de 10°C/min.

O dispositivo desenvolvido para ensaiar as molas é mostrado na Figura 1. Este dispositivo é constituído por um suporte onde é fixado um sistema de polia. A carga é aplicada a uma das extremidades da mola através de um fio inextensível e uma haste de transmissão. A outra extremidade da mola é fixada a uma placa que é engastada no suporte. Um banho térmico com óleo de silicone é utilizado para realizar a ciclagem térmica. A taxa de aquecimento e resfriamento é estimada em 8°C/min e 3°C/min respectivamente. A deformação da amostra é obtida através de um sensor de deslocamento (linear variation displacement transducer - LVDT) e a temperatura da mola é monitorada por meio de um termopar do tipo K. Os sinais destes sensores são enviados para um sistema de aquisição que armazena os dados no computador.

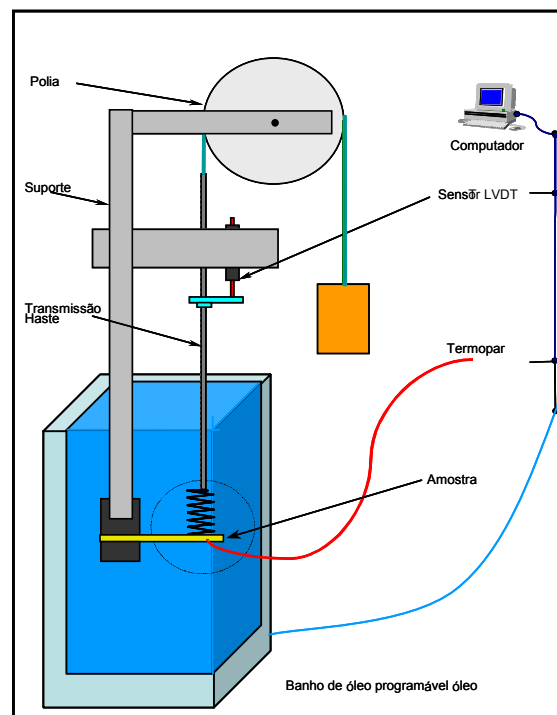


Figura 1. Esquema do dispositivo de ensaios de tração para molas sob carga de tração constante.

As molas foram submetidas a diferentes cargas cisalhantes de tração com valores de 27 MPa, 44 MPa, 55 MPa, 70 MPa, 83 MPa e 111 MPa. Após a aplicação da carga, a mola é submetida à ciclagem térmica no banho térmico programável, onde o intervalo de temperatura foi de 25°C a 150°C, com subsequente resfriamento. Este procedimento foi repetido por 50 ciclos para cada carga cisalhante. A Figura 2 mostra esquematicamente uma curva da deformação versus

temperatura obtida durante a ciclagem térmica. A partir destas curvas são determinadas as temperaturas críticas de transformação sob carga utilizando o método das tangentes onde: A_s e A_f são o início e fim da transformação inversa, M_s e M_f início e fim da transformação direta ou martensítica, H_t é histerese térmica ($H_t = A_{50} - M_{50}$) e ϵ_t é a deformação termoelástica ($\epsilon_t =$ deformação na temperatura A_s - deformação recuperada acima da temperatura A_f).

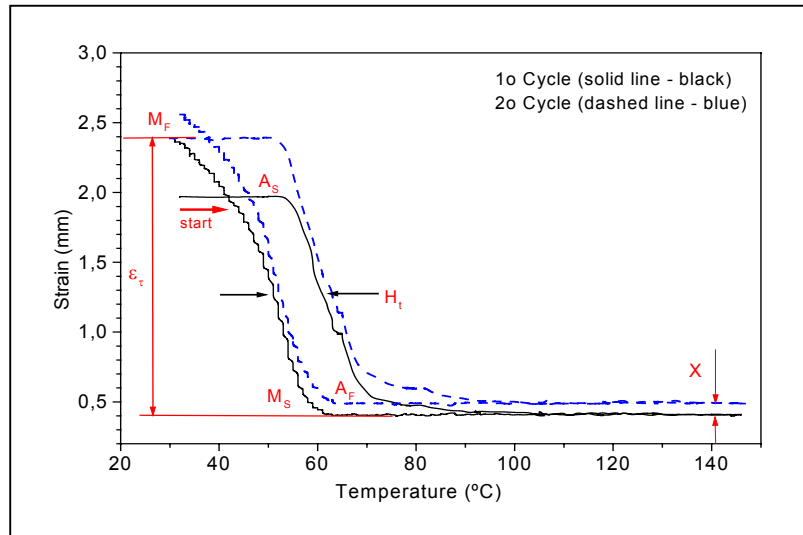


Figura 2. Representação dos principais parâmetros característicos da transformação martensítica determinados a partir da curva deformação versus temperatura.

As principais equações utilizadas no dimensionamento das molas helicoidais submetidas às cargas de tração são relacionadas abaixo:

- Tensão de Cisalhamento

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

onde: τ é a tensão de cisalhamento no material da Mola (kgf/cm^2), F é a carga axial atuante (kgf); D é o diâmetro médio da mola (cm), d - diâmetro do arame (cm), C é o índice de curvatura e igual a D/d e Kw é o fator de Wahl, que é dado por:

$$Kw = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0,615}{C} \quad (2)$$

- Deflexão da mola

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

onde: δ é a deflexão ou flecha (cm), n é o número de espiras ativas e G é o módulo de elasticidade transversal do material (kgf/cm^2).

A tensão cisalhante aplicada às molas que pode ser calculada pela fórmula da equação 1. Esta tensão é o resultado do somatório do momento torsor e da tensão normal aplicada às molas. A fórmula da equação (4) abaixo representa como estes parâmetros estão relacionados com a tensão de cisalhamento.

$$\tau = \left[\frac{M}{W_t} \right] + \left[\frac{P}{A} \right] \quad (4)$$

onde: M é o momento torsor, P é a carga aplicada, A é a área e W_t é o módulo de resistência a torsão dado pela fórmula abaixo.

$$W_t = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \quad (5)$$

A análise do momento torsor e da tensão normal que compõem separadamente a tensão de cisalhamento, permite a verificação de que o termo de maior influência na deformação da mola não é a tensão normal aplicada ao fio. A maior relevância é dada segundo a fórmula da equação 4 ao momento torsor. O momento torsor chega a apresentar uma diferença de 10 vezes o valor da tensão normal. Este momento provoca na mola durante os ensaios uma rotação que gera um deslocamento linear no sentido de aplicação da carga.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização dos Fios

A Figura 3.a apresenta a micrografia do fio utilizado na confecção das molas sem tratamento térmico. Na micrografia é observada a presença da fase α com partículas da fase β . A Figura 3.b mostra a micrografia do fio após o tratamento térmico de betatização. A amostra apresenta a microestrutura característica da fase martensita através da presença das agulhas ou plaquetas de auto-acomodação.^(10,11) Após o tratamento térmico ocorre o aumento do tamanho dos grãos das amostras.



Figura 3. Micrografias do fio de Cu-Zn-Al: a) sem tratamento e b) tratada. Aumento 400X

3.2 Calorimetria Diferencial de Varredura

A Figura 4 apresenta as curvas de calorimetria da amostra do fio após o tratamento térmico de betatização. No primeiro ciclo de aquecimento verifica-se o processo de estabilização martensítica, onde a transformação inversa necessita de maior energia para realizar a transformação, apresentando as temperaturas A_s de 70°C e A_f de 78°C.

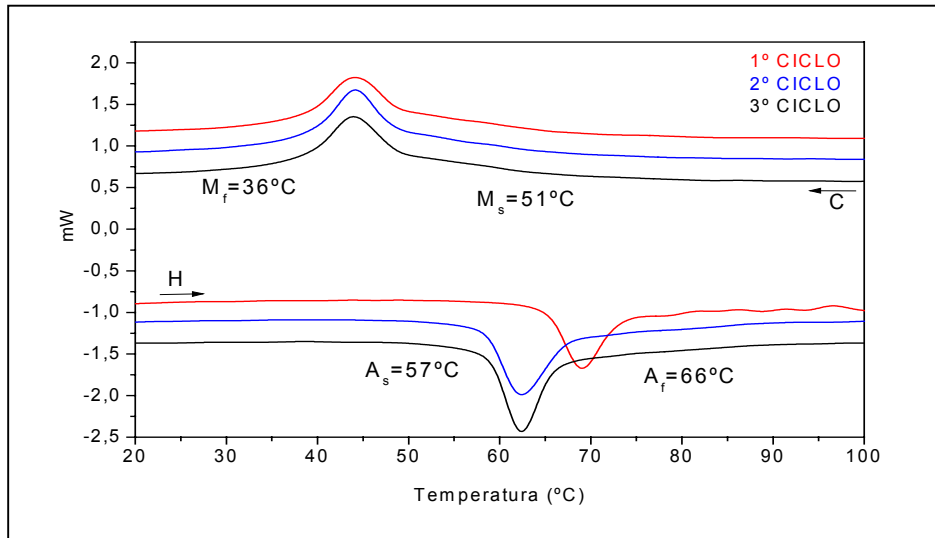


Figura 4. Curvas de calorimetria diferencial de varredura do fio de Cu-Zn-Al.

O fenômeno da estabilização ocorre devido ao bloqueio das interfaces da martensita por supersaturação de lacunas de têmpera, a transição ordem-desordem incompleta e outros fatores.^(6,7) O aquecimento da amostra promove o desbloqueio e o reordenamento da fase austenítica, eliminando os efeitos da estabilização nos ciclos térmicos subsequentes. As curvas calorimétricas tornam-se regulares apresentando as seguintes características: 57°C, A_f de 66°C, M_s de 51°C, M_f de 36°C H_f 19°C.

3.3 Ciclagem Térmica sob Carga de Tração Constante

A Figura 5 apresenta as curvas de deformação versus temperatura dos ciclos térmicos de número 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40 e 50 das molas submetidas às cargas cisalhantes de 27 MPa, 44 MPa, 70 MPa e 111 MPa, respectivamente. A aplicação da carga realizada abaixo do M_s produz uma deformação inicial para cada mola ensaiada. Esta deformação varia com o valor da carga. No aquecimento, a mola ao atingir a temperatura A_s começa a recuperar a deformação termoelástica imposta pela carga de tração. Esta recuperação termina quando a temperatura atinge a temperatura A_f . A diferença entre as deformações entre as temperaturas A_f e A_s correspondem à deformação termoelástica reversível. No resfriamento, a mola ao atingir a temperatura de transformação de fase martensítica começa a se deformar até a liga atingir a temperatura M_f . Dependendo da carga de tração imposta, esta deformação produzida no resfriamento é diferente da obtida no aquecimento, pois ela é composta pela deformação termoelástica, deformação plástica, se a carga for muito elevada, e deformações produzidas pelos processos de reorientação das variantes de martensita e da estabilização martensíticas.^(9,10) Estes processos influenciam principalmente a deformação global nos primeiros 20 ciclos térmicos, depois a deformação torna-se constante. A deformação plástica provoca o deslocamento dos laços de histerese no sentido vertical, além de diminuir a deformação termoelástica.^(7,10) O aumento do carregamento produz maior deformação plástica. Os laços de histerese variam seu comportamento quanto à amplitude de deformação (sentido vertical), temperaturas de transformação (sentido horizontal) e forma, pois com o aumento da carga o laço tende a ficar inclinado. Esta última deve-se principalmente devido a dificuldade de finalizar a transformação sob carga, ou seja, tem que ser fornecida maior energia (no caso térmica) para realizar a transformação.

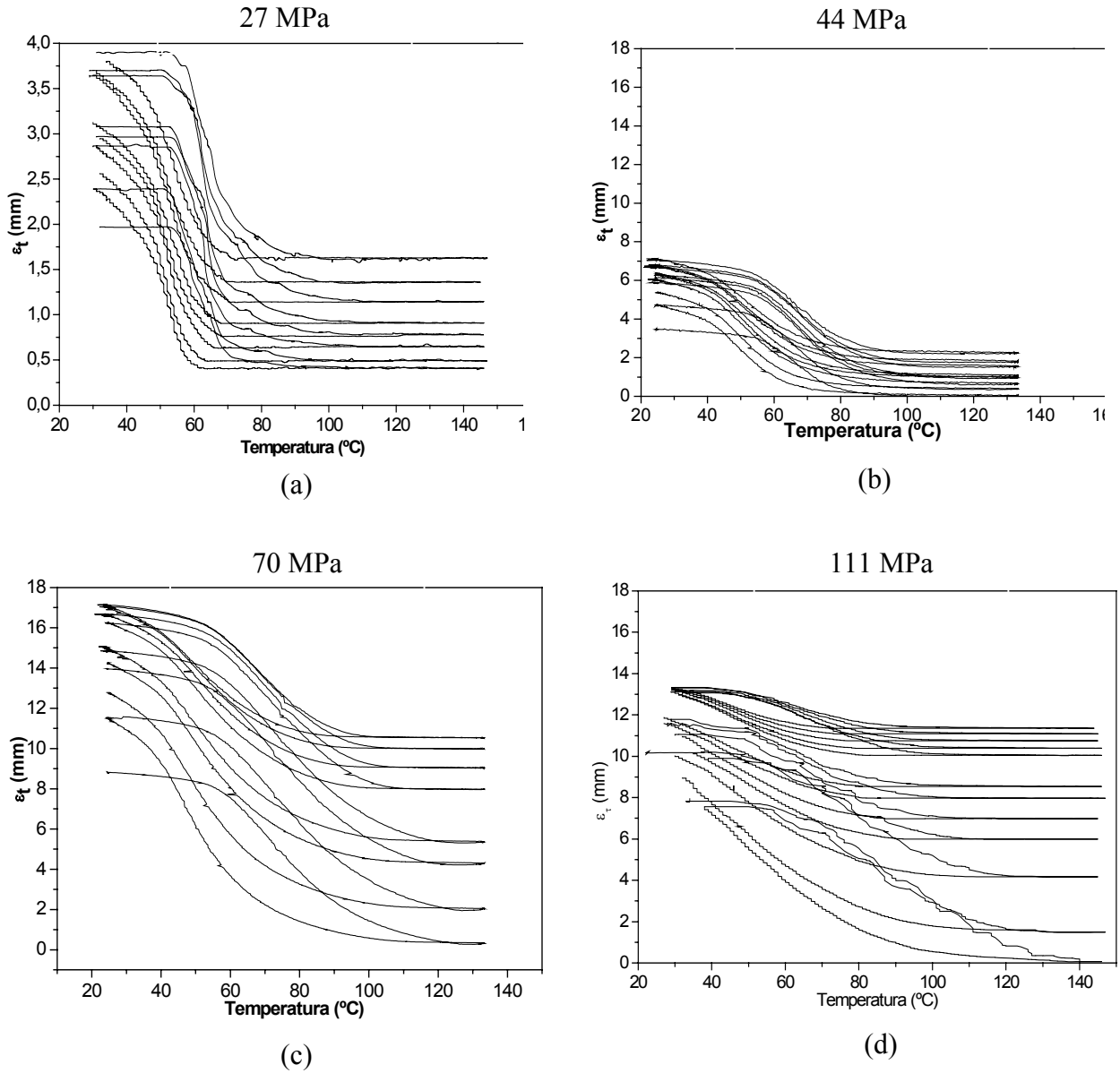


Figura 5. Curvas deformação versus temperatura das molas durante os ciclos 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40 e 50 para a carga cisalhante de 27, 44, 70 e 111 MPa. (a) carga cisalhante de 27 MPa, (b) carga cisalhante de 44 MPa, (c) carga cisalhante de 70 MPa e (d) carga cisalhante de 111 MPa.

Tabela 1. Deformações termoelásticas das molas para as diversas cargas e ciclos.

Deformação Termoelástica Total - Banho térmico (mm)									
Ciclos	Carreg	1	5	10	15	20	30	40	50
Mola 4,0 mm									
27 MPa	0,6	2,0	2,9	3,0	3,1	3,1	3,6	3,7	3,9
44 MPa	1,7	5,2	7,2	7,2	7,2	7,0	6,2	5,0	4,6
55 MPa	4,2	3,4	5,1	5,2	5,1	5,2	5,0	4,9	4,7
70 MPa	4,6	9,4	8,8	7,9	7,0	6,6	5,1	4,6	4,2
83 MPa	5,0	8,4	9,6	9,4	8,7	8,1	7,5	7,0	6,5
111 MPa	8,2	6,6	6,1	4,0	4,0	3,4	3,0	2,4	2,0

A recuperação da deformação termoelástica observada é devida ao processo de reorientação das plaquetas de martensita. Quando se aplica à carga a mola se deforma pseudo-plasticamente. Durante esta nova configuração das plaquetas ocorre também uma redistribuição das discordâncias presentes no material e de novas discordâncias geradas no caso de cargas elevadas.⁽⁸⁾ Esta nova configuração das discordâncias, que é alterada significativamente nos primeiros ciclos, produz campos de tensões internas que facilitam a transformação martensítica termoelástica nos ciclos finais (30 últimos ciclos).

A Tabela 1 apresenta a evolução da deformação termoelástica para as cargas de tração aplicadas às molas. Para a carga de 27 MPa, a deformação reversível aumentou gradualmente com o número de ciclos. As demais cargas apresentaram um aumento inicial do valor desta deformação durante os primeiros 15 ciclos, depois ela diminuiu gradativamente. Este fato está relacionado principalmente à deformação plástica introduzida na mola que se acumula durante a ciclagem térmica, provocando o encruamento do material, ou seja, criando barreiras e impedindo o movimento das plaquetas de martensita. Apesar disto, a carga que apresentou maior deformação termoelástica foi a da mola submetida à carga de 83 MPa apresentando ao final dos 50 ciclos de treinamento ou educação um valor de 6,5 mm.

A Figura 6 apresenta as temperaturas do M_s obtidas para cada carga aplicada em função do número de ciclos de treinamento. As molas submetidas às cargas de 27 MPa, 44 MPa e 55 MPa apresentam temperatura inicial do M_s distintas e uma tendência de aumento com o número de ciclos, mas a partir do 25º ciclo praticamente a temperatura torna-se constante. No caso das cargas de 83 e 111 MPa, o comportamento é inverso, com ambas apresentando o mesmo valor do M_s , com esta temperatura tendendo a diminuir com a ciclagem.

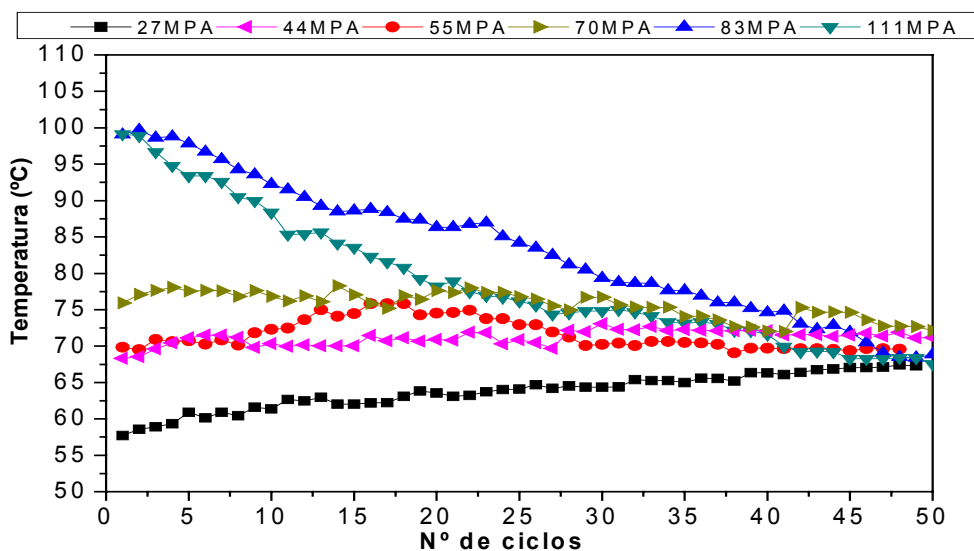


Figura 6. Curvas da temperatura crítica (M_s) versus número de ciclos para as molas submetidas às cargas de 27 MPa, 44 MPa, 55 MPa, 70 MPa, 83 MPa e 111 MPa.

A inclinação do laço para a carga de 111 MPa é inicialmente maior que para a carga de 83 MPa. Esta diminuição do M_s é explicada pela dificuldade encontrada pelas plaquetas de se transformarem, pois quanto maior as barreiras constituídas pelas discordâncias, maior a necessidade de resfriamento para ocorrer à transformação. No caso das cargas menores ocorre o inverso, pois o rearranjo das

discordâncias com a criação de campos de tensões internas facilita a transformação, com isto é necessária menos energia para ocorrer à transformação, desta forma o M_s tende a aumentar.

4 CONCLUSÕES

Neste estudo as molas de 4,0 mm de diâmetro externo foram submetidas a tensões cisalhantes de tração. Estas tensões induziram modificações nas temperaturas críticas das molas quando no processo de evolução do treinamento. A partir dos resultados obtidos por meio das ciclagens térmicas, foi possível verificar a influência que possuem as cargas aplicadas às molas e os ciclos térmicos na evolução da deformação termoelástica, da deformação plástica e na acomodação gerada pela reorientação das agulhas de martensita. A combinação dos resultados oriundos do processo de treinamento permite a verificação do melhor desempenho do efeito memória de forma nas molas submetidas às cargas de 27 MPa, 44 MPa e 55 MPa, onde é verificada uma tendência de aumento no valor da deformação termoelástica das molas. Esta deformação foi ao final dos cinquenta ciclos térmicos iguais a 3,9 mm, 4,6 mm e 4,7 mm para as molas submetidas às tensões de 27 MPa, 44 MPa e 55 MPa, respectivamente. A redução da deformação termoelástica é observada para as molas submetidas às tensões de 70 MPa, 83 MPa e 111 MPa devido ao acúmulo da deformação plástica ciclo a ciclo.

Agradecimentos

Agradecemos aos órgãos de fomento Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro e bolsas de estudo a este projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 Araújo, C. J., Silva, Edgard, Gonzalez, “Thermal alarm using a shape memory alloy helical spring”, 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering. Uberlândia - MG. Proceedings of the 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, v. 15, p. 157-163. 2001.
- 2 Francisco, M.B.F. “Ligas com memória de forma”, Centro de Investigação Científica Nacional, Universidade Nova de Lisboa, p. 1-35. 2006.
- 3 Paiva, P., Savi, M.A.; Pacheco, P.M.C.L. “Modelos constitutivos para ligas com memória de forma”, 2º Congresso Temático de Aplicações de Dinâmica e Controle da Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional (SBMAC). DINCON, Série Arquimedes, Vol. 2. 2003.
- 4 Machado, L.G.; Savi, M.A. “Medical Applications of Shape Memory Alloys”, Brazilian Journal of Medical and Biological Research, v. 36, n. 6, p. 683-691. 2003
- 5 Shigeo Maeda; Kazuhiro Abe; Keisuke Yamamoto; Osamu Tohyama; Hirotaka Ito. “Active Endoscope With SMA (shape memory alloy) Coil Springs”, Micro Electro Mechanical Systems, San Diego, CA, USA, p. 290-295. 1996.
- 6 C. H Gonzalez, C. J. Araújo, N. F Quadros, G Guénin and M. Morin. “Study of martensitic stabilisation under stress in Cu–Al–Be shape memory alloy single crystal”, Materials Science and Engineering, Vol 378, Issues 1-2, p 253-256. 25 July. 2004.

- 7 M. Ahlers "Stability of martensite in noble metal alloys", Materials Science and Engineering, A349, p.120-131. 2003.
- 8 Wang, Z.G. ; Zu, X.T. ; Feng, X.D. ; Zhu, S. ; Bao, J.W. ; Wang, L.M. "Two-way shape memory effect of TiNi alloy coil extension springs", Materials and Engineering, vol 360, p.126 -131. 2003.
- 9 Otsuka, K., Wayman, C.M. "Shape Memory Materials", Cambridge University Press, p. 1 -131. Cambridge, UK. 1998.
- 10 Oliveira,C.A.N. "Caracterização termoelástica de atuadores helicoidais da liga Cu-Zn-Al com memória de forma", UFPE. (Dissertação de Mestrado), p.1-29. Brasil. 2007.