

## Caracterização do efeito memória de forma reversível de molas de Cu-Zn-Al

C. A. N. Oliveira<sup>1\*</sup>; C. H. Gonzalez<sup>1</sup>; C. J. Araújo<sup>2</sup>; E. A. C. Pina<sup>1</sup>; S. U. Filho<sup>1</sup>; O. O. A. Filho<sup>1</sup>

<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.

(Recebido em 13/10/2009; revisado em 16/12/2009; aceito em 21/12/2009)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

---

### Resumo:

A evolução dos materiais destinados a confecção de sensores/atuadores permite a sua aplicação em áreas de elevada relevância para o desenvolvimento tecnológico, as aplicações na robótica, aeronáutica e os equipamentos médico-cirúrgicos estão entre os exemplos mais notáveis. Dentro do contexto da aplicabilidade dos materiais funcionais, encontramos as cerâmicas piezoelétricas, os fluidos eletro e magneto reológicos e as ligas com memória de forma. Este trabalho estuda o efeito memória de forma, a partir da análise dos parâmetros relacionados a atuadores com o formato de molas helicoidais e os relaciona com as transformações martensíticas observadas numa liga do sistema Cu-Zn-Al. O efeito memória de forma observado durante os ensaios termomecânicos realizados permite a aplicação desses elementos para a transmissão de forças. Os resultados observados neste estudo relacionam a termoelasticidade obtida com as molas submetidas a ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento e o comportamento das temperaturas críticas de transformação durante a evolução desses ciclos, o estudo também contempla o estudo do efeito gerado pelo acúmulo de deformação em cada ciclo desenvolvido. O estudo dessas propriedades relacionadas ao comportamento das molas helicoidais permite selecionar as principais cargas capazes de induzir a transformação de fase para o atuador em questão, bem como as cargas que induzem à degradação deste efeito.

**Palavras-chave:** Ligas de Cu-Zn-Al; efeito termoelástico; molas helicoidais; deformação plástica

---

### Abstract:

The evolution of materials to build sensors and actuators allows its application on related areas including robotic applications, aeronautics and medical-chirurgical equipments and others which can be listed as notable examples. Inside smart materials context applications there are: piezoelectric ceramics, magneto-reologic fluids and shape memory alloys. This paper studies shape memory effect on shape memory springs parameters, involving martensitic transformation on Cu-Zn-Al alloy. The effect observed on experiments allows its application on force generation. Results obtained involve thermoelastic effect on shape memory springs submitted to heat and cooling thermo-cycles and transformation temperature modifications during thermo-cycles evolution. The study of these properties allows a selection of the main charges capable to induce martensitic transformation for these actuators as well as those to induce memory effect degradation.

**Keywords:** Cu-Zn-Al alloys; thermoelastic effect; helical springs; plastic deformation

---

\* E-mail: [cano.oliveira@gmail.com](mailto:cano.oliveira@gmail.com) (C. A. N. Oliveira)

## 1. Introdução

A versatilidade dos materiais inteligentes, dentre eles as ligas com memória de forma, amplia as aplicações destes materiais em setores da indústria, medicina e aeronáutica. O principal motivação para esta evolução está no fato de estes materiais apresentarem funcionalidade como elementos sensores/atuadores, possibilitando a miniaturização aliada à redução de custos.

Além de aplicações simples e delicadas como o uso de ligas de TiNi para confecção de endoscópios cirúrgicos, que permitem intervenções cirúrgicas menos invasivas ao organismo humano facilitando o trabalho do cirurgião [1], apresentam-se também, aplicações destinadas a simular e reproduzir o movimento humano, como exemplo encontram-se as mãos robóticas, que funcionam através do efeito Joule induzido pela passagem de corrente elétrica [2, 3], além da robustez de sistemas que realizam a movimentação de elementos aerodinâmicos de aeronaves [4].

A investigação do efeito memória de forma, em molas helicoidais tem possibilitado o surgimento de mais aplicações, devendo-se essa característica a elevada capacidade de deslocamento com o uso de um reduzido comprimento de fio.

Neste trabalho é realizada a análise e comparação das propriedades das molas helicoidais, levando-se em conta molas com os diâmetros de 6,0 mm e 12,0 mm. Estes atuadores são obtidos pela conformação dos fios, seguido de tratamento térmico de homogeneização a temperatura de 850°C seguido de têmpera em água a 25°C e revenimento de 15 minutos em água a 100°C (T1) e têmpera diretamente em água a 100°C (T2).

Dentre os principais aspectos observados durante os ensaios analisou-se o comportamento da termoelasticidade, as temperaturas críticas de transformação e a adequação do comportamento elástico das molas com as principais equações de dimensionamento das mesmas, onde são feitas relações entre os resultados obtidos e os calculados.

## 2. Procedimento experimental

Os ensaios foram realizados confeccionando-se molas a partir de fios de uma

liga de Cu-Zn-Al com 0,9 mm de diâmetro e composição nominal Cu-25,3%Zn-4,0%Al (% em peso). Os fios foram conformados mecanicamente ao redor de um parafuso com diâmetro próximo ao da mola desejada. O conjunto obtido é submetido aos tratamentos térmicos definidos. Estes tratamentos térmicos foram realizados com o objetivo de se obter a fase B1', responsável pelo efeito memória de forma, bem como, a fixação do formato em espiral da mola [5].

As molas obtidas através deste procedimento têm diâmetros externos de 6,0 mm e 12,0 mm e diâmetros internos de 4,2 mm e 10,2 mm. A mola de 6,0 mm tem 8 espiras ativas e a mola de 12,0 mm tem 4 espiras ativas.

A obtenção das temperaturas críticas de transformação do fio, sem aplicação de cargas, foi obtida por meio de calorimetria diferencial de varredura (DSC). O método da calorimetria se deu por meio de ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento, com intervalo de temperatura de 0 a 150°C e taxa de 10°C/min. A importância deste ensaio reside na possibilidade de comparar as temperaturas críticas de transformação com aquelas obtidas durante os ciclos termomecânicos bem como, a influência dos tratamentos térmicos no material, através da entalpia de transformação.

As amostras de molas obtidas foram submetidas aos ensaios termomecânicos pela sollicitação de tensões constantes de tração. As tensões são aplicadas às molas através de um dispositivo, cujo esquema é apresentado na figura 1. Este dispositivo é constituído de um suporte metálico, onde é fixado um sistema de polia-massa-mola. A carga é aplicada a uma das extremidades da mola por um fio inextensível para as tensões envolvidas e uma haste de transmissão de deslocamento. A outra extremidade da mola é fixada a uma placa engastada no suporte. Os ciclos térmicos são realizados por um banho térmico programável, onde a mola é submersa em um meio de óleo de silicone. A taxa de aquecimento e resfriamento é estimada em 8°C/min. e 3°C/min., respectivamente. O deslocamento da mola é obtido por um sensor de deslocamento (LVDT) e a temperatura da mola é monitorada por meio de termopares do tipo K. Os sinais destes sensores são enviados para um sistema de aquisição de dados que faz o armazenamento dos dados de tempo, temperatura e deslocamento no computador.

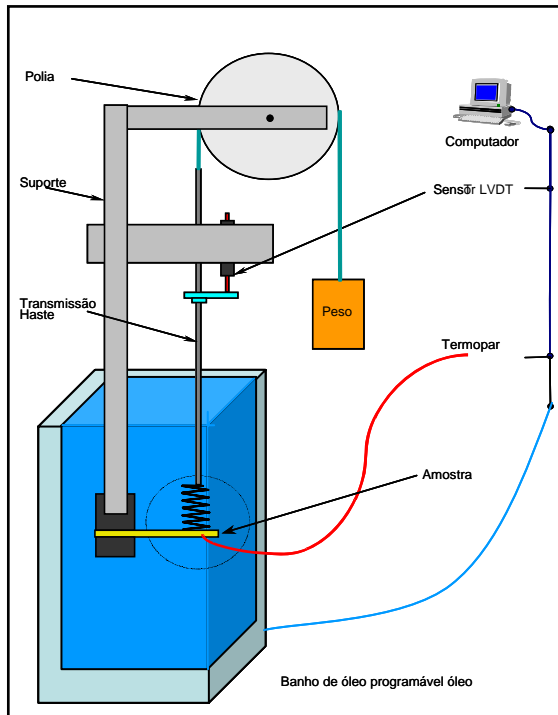


Figura 1 - Esquema do dispositivo de ensaios de tração para molas submetidas a tensões de tração.

As duas molas estudadas foram submetidas a carregamentos subsequentes de tração seguidos de variação de temperatura, no intervalo entre 25°C e 130°C. O primeiro carregamento foi executado com o banho a temperatura de 130°C. A esta temperatura, a fase predominante no material é a austenítica, que apresenta maior capacidade de solicitações sem grandes variações no comprimento inicial da mola devido a sua maior rigidez [5,6]. Após o primeiro carregamento a mola é submetida a cinco ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento. Ao final deste número de ciclos é adicionada mais carga ao material, elevando a tensão de tração aplicada. A nível de tensões de cisalhamento no fio, as cargas aplicadas foram de 20, 40 e 60 MPa.

A figura 2 apresenta o esquema do método das tangentes para a obtenção das temperaturas críticas de transformação. Esta figura também mostra a deformação plástica (x) e a termoelasticidade ( $\epsilon_t$ ). As temperaturas descritas neste método são:  $A_s$  e  $A_f$ , representando o início e fim da transformação inversa, respectivamente, as temperaturas  $M_s$  e  $M_f$ , representando início e fim da transformação direta ou martensítica, respectivamente e a

temperatura  $H_t$ , definida como histerese térmica e calculada através da aplicação da equação 1.

$$H_t = A_{50} - M_{50} \quad (1)$$

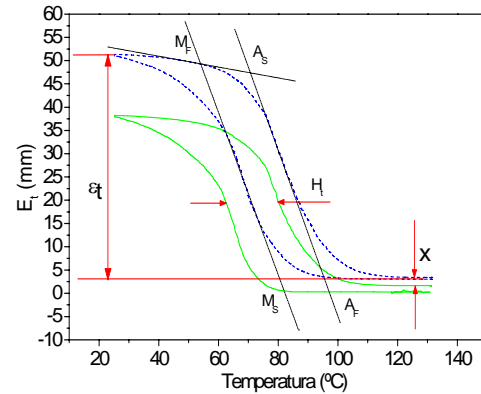


Figura 2 - Representação dos principais parâmetros característicos da transformação martensítica determinados a partir da curva deformação versus temperatura.

### 3. Mecânica das molas helicoidais

Para se proceder a comparação entre os resultados experimentais e aqueles provenientes do procedimento de dimensionamento de molas, os atuadores foram estudados levando-se em consideração os principais parâmetros envolvidos no projeto de molas helicoidais. As principais equações, utilizadas no dimensionamento das molas solicitadas com cargas de tração são relacionadas abaixo:

- Tensão de Cisalhamento

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

onde:  $\tau$  é a tensão de cisalhamento no fio da Mola ( $\text{kgf/cm}^2$ ),  $F$  é a carga axial atuante ( $\text{kgf}$ );  $D$  é o diâmetro médio da mola (cm),  $d$  - diâmetro do fio (cm),  $C$  é o índice de curvatura, proveniente da divisão entre o diâmetro da mola e o diâmetro do fio e  $K_w$  é o fator de Wahl, representado pelo equação 3.

$$K_w = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0,615}{C} \quad (3)$$

- Deflexão da mola

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

onde:  $\delta$  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<sup>2</sup>).

O cálculo da tensão de cisalhamento utilizado neste trabalho foi desenvolvido utilizando-se a equação (2). Uma análise mais refinada desta tensão permite a verificação de acordo com a equação (4) do envolvimento do momento torsor e da tensão normal aplicada à mola, na formação do valor da tensão de cisalhamento no fio.

$$\tau = \left[ \frac{M}{W_t} \right] + \left[ \frac{P}{A} \right] \quad (5)$$

Os parâmetros da equação (5) são:  $M$  é o momento torsor,  $P$  é a carga aplicada,  $A$ , é a área e  $W_t$  é o módulo de resistência a torsão definido pela equação (6) abaixo.

$$W_t = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \quad (6)$$

Através dos resultados dos ensaios realizados, verificou-se visualmente a rotação do eixo da mola. Esta rotação durante os ciclos termomecânicos facilitava a abertura da mola e, também, a perda do efeito memória de forma pelo elevado momento torsor, principal responsável pela tensão de cisalhamento calculada [5].

#### 4. Resultados e discussões

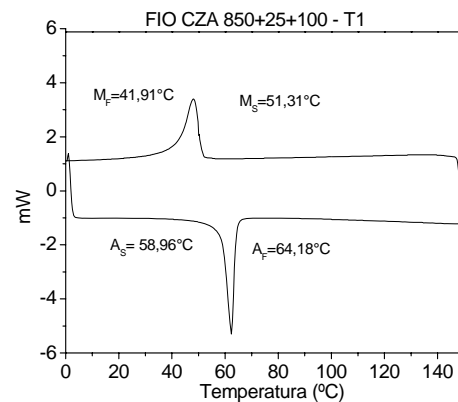
##### 4.1. Calorimetria diferencial de varredura

As figuras 3(a) e 3(b) mostram as curvas do terceiro ciclo dos ensaios de calorimetria diferencial de varredura, para os tratamentos térmicos definidos. A análise das figuras permite a visualização da maior intensidade dos picos da amostra de fio submetida ao tratamento térmico T1. Este tratamento térmico apresenta entalpia de transformação da fase austenítica para a martensítica de 5,56 J/g e o tratamento térmico T2 resulta em 1,15 J/g. Esta diferença entre as entalpias para os tratamentos térmicos

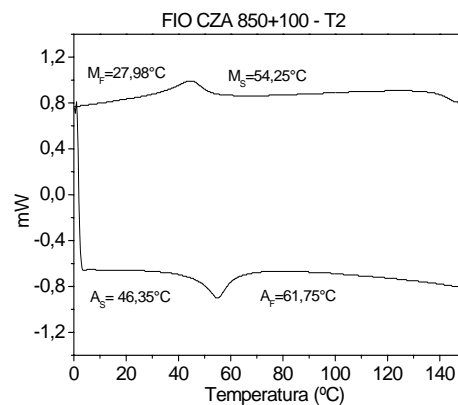
T1 e T2 se deve ao processo de estabilização da martensita devido ao bloqueio das interfaces por saturação de lacunas de têmpera e transições de ordem-desordem durante o resfriamento do material [7].

A análise das temperaturas de transformação representadas nas figuras 3.a e 3.b, mostra que o tratamento térmico T1 exigiu maior aquecimento para iniciar e completar a transformação austenítica, o valor mais elevado do  $A_s$  é uma referência da necessidade de mais aquecimento para o início da transformação. A transformação direta também ocorre mais rapidamente na amostra submetida ao tratamento térmico T1, neste caso, a transformação martensítica desenvolve menor histerese térmica para completar o processo de orientação das agulhas de martensita.

A comparação entre os resultados obtidos pelo método da calorimetria torna possível, a indicação do tratamento térmico T1, pelos picos de transformação bem definidos e a intensidade da entalpia observada no ensaio.



(a)



(b)

Figura 3. Calorimetria diferencial de varredura. (a) Tratamento T1 (b) Tratamento T2

#### 4.2. Ciclagem térmica sob carga de tração constante

A mola com 6,0 mm e com 12,0 mm de diâmetro externo foram solicitadas por carregamentos crescentes de tração. Estes carregamentos foram cuidadosamente calculados por meio da equação (2) para que as tensões de cisalhamento no fio da mola tivessem as intensidades de 20, 40 e 60 MPa. Estes carregamentos são realizados a temperatura de 130°C, devido à presença da fase austenítica, que possui maior rigidez e, por isso, é menos deformável.

As figuras 4.a e 4.b exibem o comportamento dos cinco ciclos termomecânicos obtidos durante a aplicação da tensão de cisalhamento de 40 MPa, para as molas de 6,0 mm tratadas termicamente pelos tratamentos T1 e T2. Estas figuras revelam o deslocamento vertical dos laços de histerese para os dois tratamentos térmicos em análise.

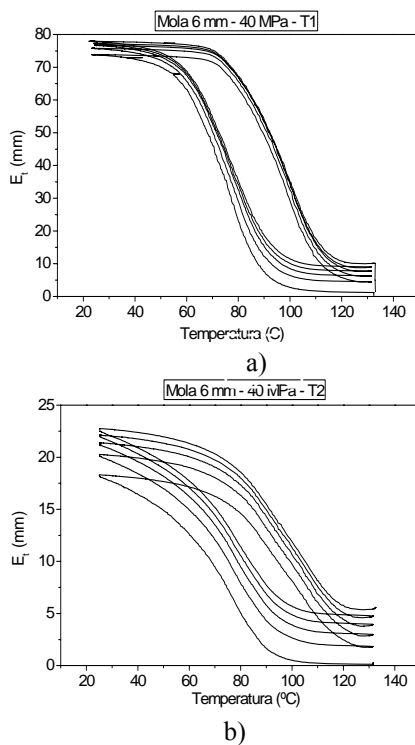


Figura 4. Curvas de deformação versus temperatura da mola de 6,0 mm com tensão de cisalhamento de 40 MPa. a) Tratamento T1. b) Tratamento T2.

O efeito termoelástico obtido pelo treinamento da mola de 6,0 mm com tratamento T1 atingiu o patamar de 70,0 mm de deslocamento, enquanto o efeito termoelástico

da mola obtida por T2 atingiu um patamar de 18,0 mm. Este fato pode ser explicado com a ajuda da entalpia de transformação, que apresenta valor mais elevado para o tratamento térmico T1 e, assim, maior facilidade para reorientação das agulhas de martensita. O tratamento térmico T2, devido ao bloqueio dessas agulhas, apresenta menor recuperação de forma, tornando-se mais susceptível aos efeitos do momento torsor na mola anulando a sua rigidez elástica.

As figuras 5(a) e 5(b) mostram o comportamento da mola de 12,0 mm de diâmetro durante o treinamento quando solicitada pela tensão de cisalhamento de 40 MPa, para os dois tratamentos executados. Estas figuras exibem um valor de termoelasticidade aparentemente superior para a mola obtida através do tratamento térmico T2. Estes dados, bem como os valores relacionados para as molas de 6,0 mm, envolvem o efeito memória de forma, somado ao efeito gerado pelo momento torsor nestes elementos. A principal consequência do conjugado destes efeitos é a maior abertura da mola. Este conjugado é mais severo quando se eleva o diâmetro nominal da mola, onde diâmetros mais elevados induzem a redução da rigidez da mola. Quando a rigidez é reduzida a mola fica mais facilmente deformável.

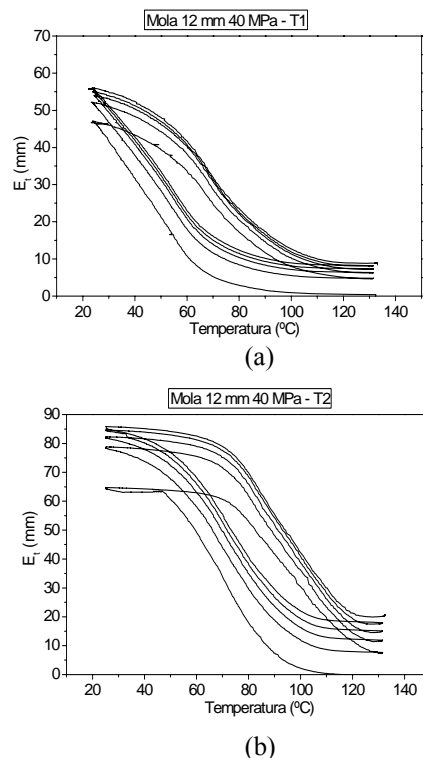


Figura 5. Curvas de deformação versus temperatura da mola de 12,0 mm com tensão de cisalhamento de 40 MPa. (a) Tratamento T1. (b) Tratamento T2

O tratamento térmico T2 apresenta segundo os parâmetros definidos pela figura 2 da secção de procedimentos experimentais, maiores valores de deformação acumulada com a evolução do treinamento.

A mola submetida ao tratamento T2 apresenta maior deslocamento linear, como apresentado pela figura 5.b. Este valores podem levar a impressão de que esta mola apresenta uma maior termoelasticidade, mas trata-se do efeito gerado pelo conjugado, que torna difícil a

correta definição do valor da termoelasticidade para este elemento.

Os demais resultados referentes ao deslocamento linear obtido através da sollicitação das molas pelas tensões de cisalhamento de 20, 40 e 60 MPa podem ser apreciados na tabela 1, onde são listadas as molas estudadas, juntamente com os tratamentos térmicos aplicados.

Tabela 1- Resultados experimentais do deslocamento linear obtidos durante o último ciclo térmico para as molas de 6,0mm e 12,0mm de diâmetro externo.

Ciclos	MOLA 6 T 1			MOLA 6 T 2		
	20 MPa	40 MPa	60 MPa	20 MPa	40 MPa	60 MPa
1	57,51	72,57	60,75	9	18,32	16,84
2	61,08	71,01	61,67	10,6	17,36	15,65
3	60,8	70,22	56,97	10,71	17,53	14,58
4	61,92	69,44	53,44	11,15	17,45	14,09
5	62,45	68,93	50,76	11,36	17,37	13,52

Ciclos	MOLA 12 T 1			MOLA 12 T 2		
	20 MPa	40 MPa	60 MPa	20 MPa	40 MPa	60 MPa
1	18,41	42,24	56,86	38,27	57,23	59,02
2	19,98	45,69	56,39	44,31	67,26	55,52
3	20,76	46,8	55,32	46,37	67,56	52,59
4	21,14	46,82	53,79	48,44	66,67	49,65
5	21,52	47,01	52,95	49,36	65,65	47,62

Tabela 2 - Temperaturas críticas de transformação para o primeiro e o quinto ciclo térmico.

Ciclos	MOLA 6 - T1						MOLA 6 - T2					
	20 MPa		40 MPa		60 MPa		20 MPa		40 MPa		60 MPa	
	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5
As	70,75	73,4	78,01	78,84	81,11	80,18	75,15	74,46	74,94	74,68	71,77	70,96
Af	88,6	100,04	112,43	112,48	128,86	121,58	97,21	99,71	117,91	118,65	122,74	110,33
Ms	71,67	84,18	87,77	92,05	96,99	101,41	79,57	85,34	89,12	95,79	89,93	96,57
Mf	57,84	59,26	58,74	58,88	56,87	56,57	58,22	57,84	47,18	52,97	39,97	41,6

Ciclos	MOLA 12 - T1						MOLA 12 - T2					
	20 MPa		40 MPa		60 MPa		20 MPa		40 MPa		60 MPa	
	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5
As	49,43	48,77	56,43	53,68	58,06	57,65	70,04	69,83	71,96	70,78	71,74	73,23
Af	79,57	81,77	87,23	92,05	109,66	104,98	92,26	96,4	120,78	116,05	124,91	112,78
Ms	63,97	70,42	60,75	70,96	69,9	81,08	71,65	80,33	87,61	93,61	96,54	94,75
Mf	24,68	22,05	23,35	27,23	27,39	27,94	53,04	54,98	49,88	50,4	43,12	52,29

A tabela 1 expõe o comportamento do deslocamento linear da mola em milímetros durante os vários ciclos térmicos realizados em relação à tensão aplicada. A análise desta tabela permite a comparação dos resultados dos ensaios da mola de 6,0 mm e 12,0 mm de diâmetro e os tratamentos térmicos T1 e T2. No

que se refere à mola de 6,0 mm, o tratamento T1 apresentou maior deslocamento, mantendo reduzidos os valores de deformação obtidos. A tensão de 40 MPa apresenta resultados interessantes, com amplitudes que atingem 70,0 mm. No que se refere à mola de 12,0 mm, a tensão de cisalhamento de 40 MPa juntamente

com o tratamento térmico T2, parece ter gerado resultados satisfatórios, em relação as demais tensões, mas ainda é necessária uma investigação mais efetiva para se definir o quanto a ação do conjugado está envolvido com os deslocamentos obtidos.

A tabela 2 exibe as temperaturas críticas de transformação em graus Celsius para o primeiro e o quinto ciclo de treinamento das molas de 6,0 mm e 12,0 mm.

As temperaturas críticas de transformação exibidas na tabela 2 apresentam, quando comparadas com os resultados de temperatura obtidas pelos ensaios de calorimetria diferencial de varredura, valores mais elevados devido à aplicação das cargas. Estes resultados identificam o crescimento das temperaturas de transformação com o aumento da tensão aplicada no material [8]. A tendência de elevação dos valores de temperatura pode ser explicada pela maior energia térmica necessária a transformação austenítica [9]. A redução da energia térmica, representada pela redução das temperaturas de transformação  $A_s$  e  $A_f$ , durante a evolução dos ciclos termomecânicos, é o reflexo da orientação de mais agulhas de martensita que se tornam preferenciais durante o processo de educação [10-12]. A comparação dos tratamentos térmicos T1 e T2, corrobora a assertiva de que o tratamento T1 orienta mais agulhas de martensita, requerendo portanto menos energia para realizar a transformação. Este fato fica evidenciado através das temperaturas críticas de T1 que são de maneira geral inferiores àquelas do tratamento T2.

### 4.3. Comparativo da deflexão do efeito memória de forma com o cálculo da deflexão de molas

A deflexão das molas é definida como o alongamento linear, quando esta é submetida a carregamentos axiais. Esta deflexão pode ser obtida de acordo com a seção dos procedimentos experimentais pelo uso da equação (3). Neste trabalho é desenvolvida a comparação das deflexões observadas nas molas com efeito memória de forma durante o treinamento termomecânico com os resultados esperados fazendo-se o uso da equação apropriada. Para proceder com os cálculos teóricos da deflexão, tomou-se como referência o módulo de elasticidade transversal para a fase austenítica das ligas de Cu-Zn-Al como sendo 2,5E104 MPa (254929,1 kgf/cm<sup>2</sup>) [13].

A tabela 3 apresenta as deflexões obtidas durante o processo de educação e pelo uso da equação (3). A comparação destes dados, mostra de forma geral valores calculados muito inferiores aqueles obtidos experimentalmente. Esta diferença é um dos fatores demonstrativos da dificuldade de se dimensionar uma mola com memória de forma aplicando as equações convencionais do dimensionamento de molas mecânicas.

Esta diferença entre os resultados gera a necessidade em se elaborar um modelo matemático capaz de definir o comportamento do atuador.

Tabela 3 - Deflexão em milímetros das molas obtida experimentalmente e calculada pelos critérios de dimensionamento de molas.

MOLA 6 T1						
Ciclos	20 MPa	Cal.	40 MPa	Cal.	60 MPa	Cal.
5,00	62,45	6,61	68,93	13,22	50,76	19,84
MOLA 12 T1						
Ciclos	20 MPa	Cal.	40 MPa	Cal.	60 MPa	Cal.
5,00	21,52	14,88	47,01	29,75	52,95	44,63
MOLA 6 T2						
Ciclos	20 MPa	Cal.	40 MPa	Cal.	60 MPa	Cal.
5,00	11,36	6,61	17,37	13,22	13,52	19,84
MOLA 12 T2						
Ciclos	20 MPa	Cal.	40 MPa	Cal.	60 MPa	Cal.
5,00	49,36	14,88	65,65	29,75	47,62	44,63

## 5. Conclusões

Neste artigo foram analisadas molas com 6,0 mm e 12,0 mm de diâmetro. Tensões de cisalhamento de 20, 40 e 60 Mpa foram aplicadas. Estas tensões induziram modificações no comportamento do efeito memória de forma do material durante o treinamento. As modificações podem ser visualizadas através da variação da termoelasticidade e das temperaturas críticas de transformação. O melhor desempenho da termoelasticidade obtida nas molas tratadas através do tratamento térmico T1, permite a confirmação dos resultados obtidos por meio dos ensaios de calorimetria diferencial de varredura feito por Euclides et al, 2007, que definem o tratamento de homogeneização a temperatura de 850°C com têmpera em água a 25°C e revenido de 15 min. a temperatura de 100°C (T1) como sendo o melhor tratamento a ser executado para a liga de Cu-Zn-Al estudada.

Observou-se também que o procedimento de cálculo definido inicialmente através das fórmulas de dimensionamento de molas mecânicas gera problemas com os resultados obtidos experimentalmente e por isso existe a necessidade da definição de novas equações que permitam o cálculo do comportamento da mola quando submetido a tensões elevadas.

## 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] 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.
- [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] Pollard, E; Korde, U; Jenkins, C. Modeling of Shape Memory Alloy Micro-Actuators for Space Applications. *CANEUS. Conference on Micro-Nano-Technologies*. 2004. p. 1-5.
- [5] Oliveira, C.A.N. Caracterização termoelástica de atuadores helicoidais da liga Cu-Zn-Al com memória de forma. UFPE. (Dissertação de Mestrado), Brasil. p.29-75. 2007.
- [6] Otsuka, K., Wayman, C.M. *Shape Memory Materials*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1998.
- [7] Ahlers, M. Matensite and equilibrium phases in Cu-Zn and Cu-Zn-Al alloys. *Progress in Materials Science*. 1986, Vol. 30, p. 135-186.
- [8] Piao, M.; Otsuka, K; Miyazaki, S; Horikawa, H. Mechanismo of the As Temperature Increase by Pre-deformation in Thermoelastic Alloys. *Material Transactions. JIM*. Vol. 34 Nº 10. p. 919-929. 1993.
- [9] Perkins, J.; Muesing, W.E. Martensitic Transformation Cycling Effects in Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys. *American Society for Metals and The Metallurgical Society of AIME*. Vol. 14A. p. 33. 1983.
- [10] Oliveira, C.A.N; Gonzalez, C.H; Araújo, C.J; Rocha, J.O.S; Urtiga Filho, S.L; Quadros, N.F. Thermoelastic Characterization of Cu-Zn-Al shape memory Alloy spring actuators. *19th International Congress of Mechanical Engineering ABCM*. Brasília, DF. November 5-9, 2007.
- [11] Pina, E. A. C; Gonzalez, C.H; Oliveira, C.A.N; Urtiga Filho, S.L; Quadros, N.F. Transições ordem-desordem nas ligas a base de cobre com memória de forma. *Congreso Ibero Americano de Ingeniería Mecânica*. 2007.
- [12] Pina, E. A. C. *Estudo da Estabilização na Liga Cu-Al-Mn com Memória de Forma*. Dissertação de Mestrado UFPE. Recife. p. 1 – 23. 2006.
- [13] Guénin, G. *Alliages à mémoire de forme*. Institut National des Sciences Appliquées. França. 1996.