

## **FABRICAÇÃO DE MINI-MOLAS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA (SMA): COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO**

Abdias Gomes dos Santos <sup>1\*</sup>, Carlos José de Araújo<sup>2</sup>, Kleberton R. A. Barboza <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Mestrando em Engenharia Mecânica, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFPE, Recife, PE. \*Autor para correspondência.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Professor. Doutor Carlos José de Araújo, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB.

<sup>3</sup> Mestrando em Ciências e Engenharia de Materiais, Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, UFCG, Campina Grande, PB.

Avenida Assis Chateaubriand, Nº 02 – Centro. Queimadas, PB. CEP: 58475-30. E-mail: engmec\_abdias@hotmail.com

### **RESUMO**

As mini molas com memória de forma são de grande importância, pois fazem parte de um grupo de atuadores termomecânicos em que estas são vastamente utilizadas por sua capacidade de converter energia térmica em energia mecânica. A obtenção das mini molas estudadas se dá a partir do processo de conformação mecânica do fio superelástico em torno de um mandril seguido de um tratamento térmico para a obtenção do efeito memória de forma e do formato característico de uma mola. Após a obtenção dessas mini molas, realizou-se testes em um Analisador Dinâmico-Mecânico (do inglês: Dynamical Mechanical Analyzer – DMA) para caracterização de suas propriedades mecânicas em função da temperatura, em que pôde-se observar a grande capacidade de geração de forças mesmo com dimensões relativamente pequenas e a grande variação do coeficiente de rigidez da mini mola em torno das temperaturas de transformação de fase. Os fatos

apresentados revelam o grande potencial destas mini molas como atuadores de baixo ruído.

Palavras-chave: Mini molas, Ligas com Memória de forma, Superelasticidade, Caracterização termomecânica.

## 1. INTRODUÇÃO

As Ligas com Memória de Forma (LMF), internacionalmente conhecidas por *Shape Memory Alloys* (SMA), fazem parte de um grupo seleto de materiais de engenharia classificados como materiais ativos ou inteligentes. Estes materiais são assim denominados por responderem mecanicamente a estímulos não mecânicos, como campos de temperatura, elétricos, magnéticos, entre outros (1).

O fenômeno de transformação martensítica termoelástica cristalograficamente reversível, que ocorre em estado sólido, é o responsável pelas duas principais características termomecânicas das LMF: o efeito memória de forma (EMF) e a superelasticidade (SE).

Uma vez deformado a uma temperatura mais baixa e aquecida, a LMF tem a propriedade de retornar a sua forma anterior a deformação pseudo plástica induzida na fase martensítica (baixa temperatura e menor rigidez) quando a temperatura é suficiente para atingir a fase austenítica (alta temperatura e maior rigidez), fenômeno da memória de forma, e caso algo impeça a LMF de retornar a sua forma original, este responde com uma força crescente com a temperatura (2). No EMF a recuperação da forma pode ser de até 8 % para atuadores de LMF unidirecionais, como fios e fitas. Esse nível de deformação é bastante alto, comparativamente aos materiais metálicos clássicos que tem região de deformação elástica bem mais limitada, convencionada em 0,2 % (6). Quando o material se encontra na fase Austenita e o carregamento mecânico é imposto gera-se uma deformação que pode atingir os mesmos níveis do EMF (~8 %). Ao ser retirado o carregamento, a LMF pode recuperar totalmente a forma inicial, sem a necessidade de variações da temperatura. Esse fenômeno é denominado de superelasticidade.

Os atuadores lineares de LMF no formato de molas podem proporcionar uma relação de força gerada/peso considerável. Mini molas de LMF podem suportar uma vida em fadiga de até 600.000 ciclos de aquecimento e resfriamento.

Desta forma o objetivo geral deste trabalho foi fabricar e avaliar o comportamento termomecânico de um atuador do tipo mini mola de LMF concebido a partir de fios de NiTi comerciais. As mini molas foram obtidas através de conformação mecânica em um mini mandril com rosca helicoidal seguido de um tratamento térmico específico. A caracterização térmica foi realizada com a calorimetria diferencial de

varredura (DSC) enquanto para a caracterização termomecânica utilizou-se análise dinâmico-mecânica (DMA) em um equipamento comercial.

### 1.1. A FABRICAÇÃO DOS ATUADORES.

Todos os experimentos relativos a este trabalho foram realizados no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA), integrante da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), onde foi preparado um mini mandril roscado como mostrado na Figura 1, este contendo furos nos centros que vai servir como guia para o fio, essas guias tem a função de centrar as extremidades da mola, o mandril também disponibiliza de rasgos radiais como mostrado na Figura 1 que liga a região do centro a periferia do mini mandril possibilitando assim com que o fio saia do centro do mandril conforme-se nas depressões da região roscada e retorne ao centro do mini mandril ao fim do processo de conformação mecânica, o fio é fixo por elementos mecânicos e todo o conjunto passa por um tratamento térmico.

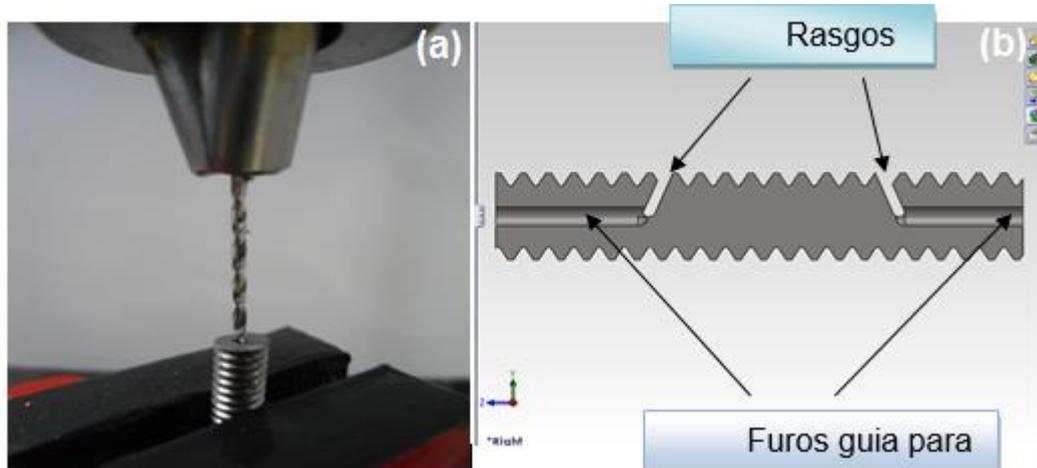


Figura 1. Mandril roscado sendo furado (a); Desenho em corte do mandril (b).

### 1.2. O TRATAMENTO TÉRMICO.

Os atuadores foram fabricados com fios de NiTi comercial de 0,4mm de diâmetro, submetidos ao tratamento térmico de tempera, aquecimento a uma temperatura de 450°C durante 20 minutos em um forno da marca Platiniun quartz do tipo Titan platiniun quartz, com subsequente resfriamento brusco em água a

temperatura ambiente ( $\sim 27^{\circ}\text{C}$ ). Para que o material apresente o efeito memória de forma. A mola é liberada do mini mandril roscado e caracterizada térmica e termo mecanicamente.



Figura 2. Forno para tratamento térmico da mola e ampliação.

### 1.3. CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA.

A caracterização térmica dos atuadores foi realizada usando a técnica de calorimetria exploratória diferencial (DSC), utilizando-se do calorímetro modelo Q20 da TA Instruments, mostrado na Figura 3(a).

Os ensaios de DSC foram realizados na faixa de temperatura de  $120^{\circ}\text{C}$  à  $-70^{\circ}\text{C}$ , com uma taxa de aquecimento e resfriamento de  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  isso usando o atuador completo como mostrado na Figura 3(b).

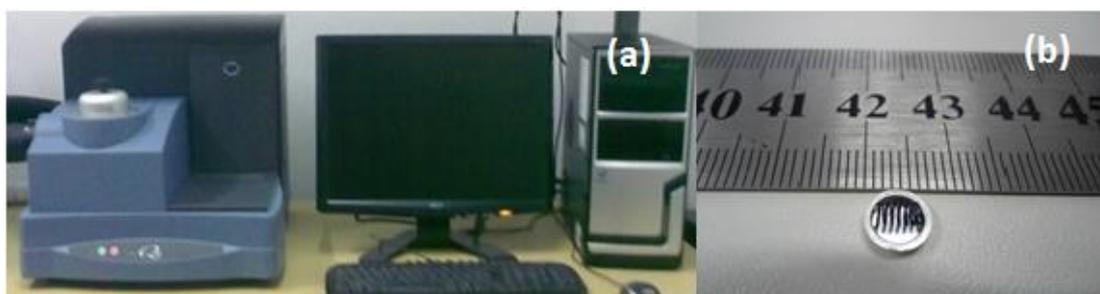


Figure 3. (a) Equipamento de DSC Q20 da TA Instruments, (b) mini mola 01 de LMF dentro do reservatório para ensaio de DSC.

#### 1.4. A CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA

As mini molas foram submetidas a testes de tração uniaxial em um Analisador Dinâmico Mecânico (DMA) da marca TA Instruments, modelo Q800 e utilizou-se a garra de tensão uniaxial do equipamento.

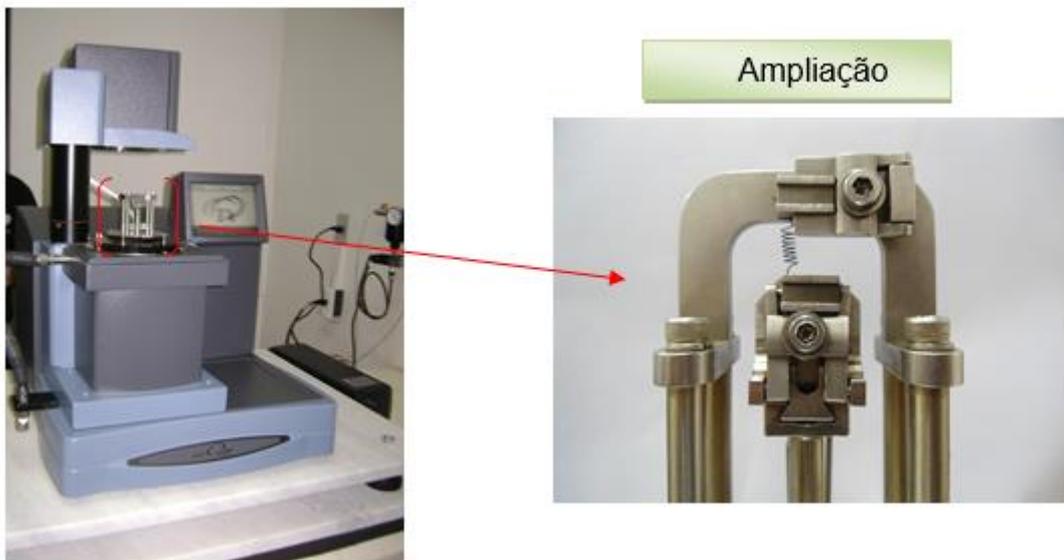


Figura 4. (a) Analisador Dinâmico Mecânico (DMA) da TA Instruments, modelo Q800. (b) Detalhe da garra de tração com a mini mola 01 fixa.

Neste equipamento a mini mola foi submetida ao seguinte protocolo de testes:

- Treinamento: as mini molas foram submetidas a 50 ciclos de carregamento até os respectivos valores de  $\epsilon_{\text{máx}} = 300\%$  e descarregamento até zero, deformação em temperatura  $20^{\circ}\text{C}$  acima de  $A_f$ . Nesse processo cíclico foi usada uma taxa de deformação de  $150\%/min$  para diminuir o tempo total de treinamento;
- Realização de ciclos de deformação em várias temperaturas: foram realizados seis ciclos de deformação para cada mini mola. Para a mola 01 partiu-se de  $\epsilon_{\text{máx}}(\text{mini mola 01}) = 50\%$  com acréscimo de passo de  $50\%$  até  $\epsilon_{\text{máx}}(\text{mini mola 01}) = 300\%$ . Cada ciclo foi repetido para as temperaturas de teste de  $30^{\circ}\text{C}$  até  $100^{\circ}\text{C}$ , com passo de  $10^{\circ}\text{C}$ . A temperatura mínima de teste foi escolhida devido à limitação técnica de efetuar um resfriamento abaixo da temperatura ambiente; e a temperatura máxima, por sua vez, foi selecionada de modo a não ultrapassar um limite

de aquecimento da LMF, acima do qual a liga pode ter seu comportamento comprometido. A taxa de deformação utilizada foi de 150%/min para todos os ciclos, e a cada deformação a mola era aquecida a uma temperatura acima de  $A_f$  para recuperar a forma original (sem deformação) antes de realizar um acréscimo de temperatura no novo ciclo.

- Realização de ciclos de deformação em temperaturas constante 20° acima de  $A_f$  com  $\epsilon_{\text{máx}}(01) = 300\%$  partindo do seu comprimento indeformado, seguido de um alívio da carga ate a mini mola retornar a seu comprimento original.

## 2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 5 apresenta os termogramas DSC obtidos para o atuador mini mola 01, após o tratamento térmico de tempera. A partir do método das tangentes aplicados aos picos de transformação, definido pelas normas internacionais ASTM F2004(3), F2005 (4) e F2082 (5), foram obtidos os resultados das temperaturas de transformação dos atuadores.

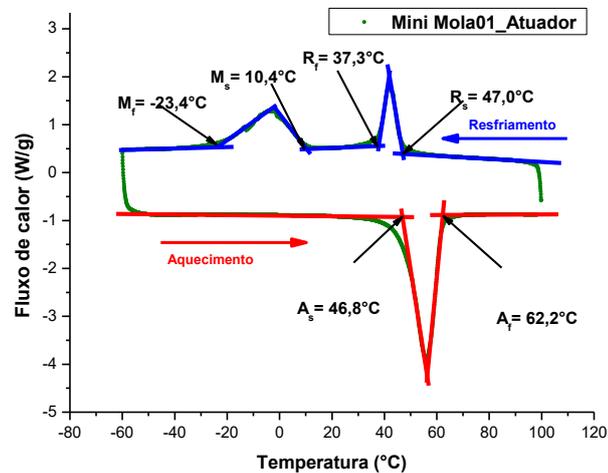


Figura 5. Termograma do atuador mini mola 01 a partir do ensaio de DCS.

Na Figura 6 pode ser observada as curva característica de carregamento e descarregamento resultantes dos testes referente à etapa 2 do protocolo de testes, temos a ciclagem térmica, redução da área de histerese presente, que fornece a

medida da capacidade de dissipação de energia do atuador, a medida que os ciclos vão sendo executado o comportamento da curva tende a ficar mais estável.

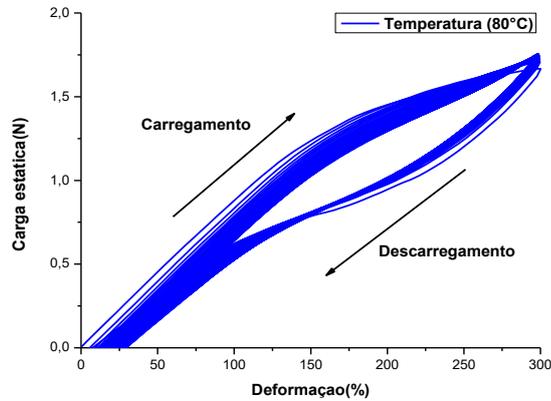


Figura 6. Ciclos de carregamento e descarregamento da mini mola 01 a uma temperatura de 80°C

Como o ensaio é realizado mantendo a deformação de início e fim aplicado pelas arras à medida que o material se estabiliza ele guarda uma deformação residual que vai diminuindo gradativamente, resultado da organização micro estrutural do material, nesse caso para o primeiro ciclo a deformação residual ficou em torno de 12%, já a deformação residual apresentado no ultimo ciclo é tão pequeno que pode ser considerada zero.

## 2.1. O EFEITO MEMORIA DE FORMA

Através da Figura 7 podemos avaliar o efeito memória de forma onde à medida que o material a próxima a temperatura de  $A_f$ , Tende a recuperar a forma original e ao ultrapassar esta, a deformação é totalmente recuperada

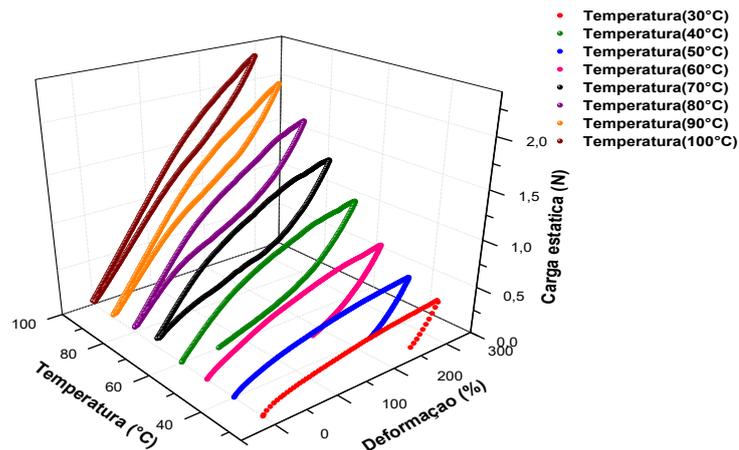


Figura 7. Gráficos da carga estática em função da deformação em várias temperaturas na mini mola 01.

A partir destes resultados podemos afirmar que o efeito memória de forma é considerável onde o atuador mini mola recuperou 300% de deformação residual a uma temperatura de 100°C, em cada etapa deste ensaio a mini mola foi reaquescida para retornar a forma original (sem deformação) para um novo ciclo, na Figura 7 nota-se que o ensaio começou com uma pré-carga em torno de 0,1N, este fenômeno se dá pelo fato da mini mola ter sido fixada na garra no estado martensítico e sofrer uma deformação causada pelo peso da própria garra, ao atingir temperaturas acima de  $A_f$  a mini mola tende a recuperar essa deformação imposta gerando uma força, esta sentida pelo DMA e expressa no gráfico.

## 2.2. O EFEITO DA SUPERELASTICIDADE.

Como já foi supracitado outro fenômeno das LMF é o fenômeno da superelasticidade, este pode ser avaliado a partir dos gráficos abaixo na Figura 9

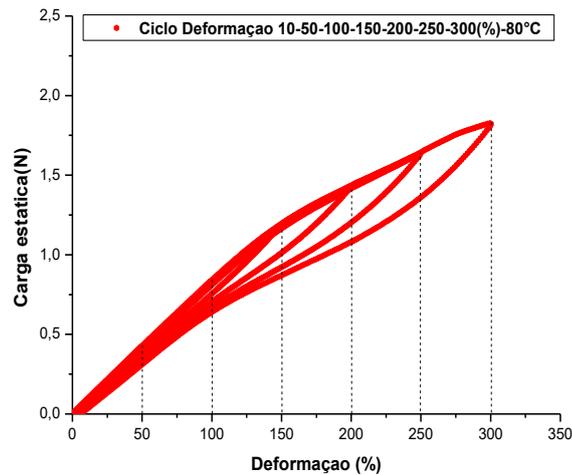


Figura 9. Gráficos da carga estática máxima em função da deformação de 50 a 300% com acréscimo de 50% em cada ciclo;

Podemos avaliar o potencial que as mini molas de LMF possuem de recuperar o seu estado original sem nenhum acréscimo térmico no sistema, isso após o atuador ultrapassar temperaturas acima da temperatura final de martensita reversível ( $A_f$ ), note que o para a mini mola 01 submetido a deformações de 300% apresenta deformação residual tendendo a zero, e apresenta um patamar de descarregamento próximo a configuração linear, o que dá a ela uma gama de aplicações com ênfase na ortodontia entre outros.

### 3. CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas a partir deste trabalho estão descritas abaixo:

- A concepção de mini molas a partir de fios de LMF é possível usando o processo de conformação mecânica obtendo assim um baixo custo na produção e um resultado satisfatório.
- A força necessária para aplicar a mesma deformação nas mini molas aumenta com a temperatura obedecendo a lei de Clausius-Clapeyron, devido à mudança de fase precisar de mais energia mecânica para ocorrer, em suma ocorre um aumento da rigidez, comportamento característico das LMF.

- Para a mini mola 01 a carga estática máxima varia de forma linear com o aumento da temperatura a uma deformação de 300% do seu comprimento indeformado a deformação residual apresentada para a temperatura de 100°C ficou em torno de 1%.
- As molas de LMF possuem comportamento histerético de força durante os ciclos de carregamento e descarregamento. O nível desta histerese diminuiu com o aumento da temperatura para o regime de deformação aplicado, pois à medida que a temperatura aumenta a transformação de fase (austenita-martensita) tarda em ocorrer, também apresenta o fenômeno de memória de ponto de retorno, que garante que quando um ciclo menor é realizado dentro de um maior, ele sempre estará completamente contido dentro do maior. Em outras palavras para níveis de força maior sempre será observado deformações maiores e níveis de histerese maior.
- A deformação residual apresentado a temperaturas de 80°C sem que algum acréscimo de temperatura, ficou em torno de 1% confirmando assim a capacidade apresentado na literatura pelas LMF de recuperar grande parte da deformação a ela imposta.

#### 4. REFERÊNCIAS

(1) LAGOUDAS, D.; **Shape Memory Alloys (Modeling and Engineering Applications)**, Editora: Springer Science+Business Media, LLC, 2008.

(2) OTSUKA, K.; WAYMAN, C.M.; 1998, **Shape Memory Materials**. Cambridge, UK: Cambridge University Press

(3) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM F2004-5 - "Standard Test Method for Transformation Temperature of Nickel-Titanium Alloys by Thermal Analysis". 2005. Annual Book of ASTM Standards, vol. 13.01, West Conshohocken, United States, (2005).

(4) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM F2005-5 - "Standard Terminology for Nickel-Titanium Shape Memory Alloys". 2005. Annual

Book of ASTM Standards, vol. 13.01, pp.1-3, West Conshohocken, United States, (2005).

(5) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM F2082-5 - "Standard Test Method for Determination of Transformation Temperature of Nickel-Titanium Shape Memory Alloys by Bend and Free Recovery". 2005. Annual Book of ASTM Standards, vol. 13.01, pp.1-7, West Conshohocken, United States, (2006).

(6) Callister Jr, William D., 2007 "Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução". John Wiley & Sons, Inc., 7ª edição, Nova York, NY. 705p.

## **SHAPE MEMORY ALLOY (SMA) MINI SPRINGS FABRICATION: THERMOMECHANICAL BEHAVIOR**

### **ABSTRACT**

The SMA (Shape Memory Alloy) mini springs has great importance, because it's part of a thermomechanical actuators group and has the ability to convert thermal in mechanical energy. The mini springs studied were obtained by mechanical forming of the superelastic wire around of a chuck followed by heat treatment process in order to obtain shape memory effect and the characteristic spring shape. After obtained the mini springs, tests were realized in a Dynamichal Mechanical Analyzer (DMA) in order to characterize its mechanical proprieties in function of temperature, it showed great capability of strength generation even with relatively small dimensions and elastic module great variation of the mini spring around phase transformation temperatures. The presented facts reveal the great potential of these mini springs ass low noise actuators.

**Keywords:** Shape Memory Alloys, mini springs, low noise actuators.