

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO ELETROMECAÂNICO DE MINI MOLAS SUPERELÁSTICAS DE Ni-Ti EM REGIME DE EFEITO MEMÓRIA DE FORMA SOB CARGA CONSTANTE

Roana d'Ávila Souza Monteiro, roana.davila@gmail.com¹
Eisenhower de Moura Fernandes, eisenhower@ee.ufcg.edu.br¹
Carlos José de Araújo, carlos.araujo@ufcg.edu.br¹

¹Universidade Federal de Campina Grande, Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA), Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Av. Aprígio Veloso, 882 – Bairro Universitário, CEP: 58429-140, Campina Grande - PB

Resumo: As Ligas com Memória de Forma (LMF) constituem uma classe de materiais metálicos que possuem a capacidade de recuperar uma deformação pseudo plástica, introduzida por aplicação de carga mecânica, e retornar à sua forma original através de um simples aquecimento. Adicionalmente, o principal interesse em atuadores de LMF no formato de molas helicoidais reside no grande deslocamento proporcionado pelo fenômeno de Efeito Memória de Forma (EMF), que permite a realização de trabalho mecânico quando este componente é submetido a diferentes condições de temperatura e carga mecânica. No caso de elementos de LMF em estado de superelasticidade (SE) na temperatura ambiente, quando a carga mecânica é aplicada e mantida sob o material, a deformação originada pela formação de martensita induzida por tensão poderá também ser revertida por meio de um aquecimento. Nesse caso, tem-se um EMF em um elemento de LMF originalmente superelástico. O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento do deslocamento com a variação de resistência elétrica em mini molas de LMF do sistema Ni-Ti. Para isso, foi desenvolvida uma plataforma experimental capaz de submeter a mini mola a carregamento mecânico constante (peso) e a excitação em corrente elétrica variável com o tempo para promover o aquecimento por efeito Joule. Foi verificada uma relação praticamente linear e sem histerese entre a variação do deslocamento e a variação de resistência elétrica, no aquecimento e no resfriamento da mini mola de LMF. Esse comportamento é importante pois pode permitir o controle da posição da mini mola de LMF apenas monitorando a resistência elétrica, independentemente deste atuador estar sendo aquecido ou resfriado em um determinado instante.

Palavras-chave: Ligas de Ni-Ti, Nitinol, Mini molas helicoidais, Superelasticidade, Caracterização eletromecânica.

1. INTRODUÇÃO

A indústria tem buscado cada vez mais elementos e materiais capazes de reduzir custos e otimizar operações. Estas melhorias vêm acontecendo por meio da redução de espaço (miniaturização), resposta mais rápida a comandos e maior rendimento energético (Jani *et. al*, 2014). Nesse cenário, a versatilidade dos materiais inteligentes, dentre estes as ligas com memória de forma (LMF) ou SMA (*Shape Memory Alloys*), vem ampliando as aplicações destes materiais em inúmeros setores: odontologia, medicina, robótica, aeronáutica, entre outros. A principal motivação para esta evolução está no fato destes materiais apresentarem algum nível de funcionalidade, podendo agir como elementos sensores/atuadores. As LMF de Ni-Ti são as mais bem sucedidas e exploradas dentre aquelas que exibem o Efeito Memória de Forma (EMF) (Otuska & Wayman, 1998).

O principal interesse nos atuadores de LMF utilizados como molas helicoidais reside na possibilidade de obter um maior deslocamento linear com alguma capacidade de carga proporcionados pelo efeito memória de forma que permite a realização de trabalho mecânico quando o componente é submetido a diferentes condições de temperaturas e cargas mecânicas.

Assim sendo, neste trabalho foi estudado o comportamento eletromecânico de mini molas superelásticas de LMF Ni-Ti originalmente aplicadas na área odontológica. Para tanto, foi desenvolvida uma estrutura mecânica para compor uma plataforma experimental com o intuito de submeter mini molas de LMF Ni-Ti a cargas constantes, variando entre 100 e 200 gramas e realizar a ativação por aquecimento resistivo (efeito Joule) controlado. Essa plataforma permite

obter curvas características de resposta eletro-termomecânicas das mini molas sob cargas constantes, correspondentes a deslocamento em função da corrente elétrica de ativação e da temperatura, além de resistência elétrica em função da temperatura.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o estudo experimental foi desenvolvida uma plataforma para determinação do comportamento de atuadores do tipo mini molas helicoidais de LMF com ativação por meio de sinais de corrente elétrica controlada (aquecimento por efeito Joule). Esse sistema é composto de uma estrutura mecânica para fixação da mini mola de LMF tensionada por uma carga mecânica (peso); uma fonte de alimentação de 12 V; uma fonte de corrente e tensão; um circuito de condicionamento da temperatura (drive de temperatura) e outro para controlar a corrente (drive de corrente de SMA); um LVDT; um sistema de aquisição de dados da *National Instruments* e um computador com o *software LabVIEW*.

2.1. Mini molas de LMF Ni-Ti

O sistema mencionado anteriormente tem como propósito permitir a caracterização eletromecânica de molas miniaturizadas de LMF superelásticas para futura aplicação como atuador em mini sistemas eletromecânicos. Estes elementos helicoidais são originalmente usados na ortodontia para movimentação lenta e gradual dos dentes pela aplicação de força na arcada dentária e se encontram no seu estado austenítico à temperatura ambiente (caracterizada como a alta temperatura, nesse caso). Quando uma carga mecânica, variável ou constante, suficientemente alta, é aplicada nestas mini molas, é possível induzir martensita por tensão mecânica originando grandes deformações, de até 600 % do comprimento útil da mola (An *et al*, 2012). Estes níveis de deformação podem ser recuperados por aquecimento.

A mini mola utilizada neste trabalho, conforme indicado na Fig. 1, é completamente fechada (mola de tração), apresentando as seguintes características dimensionais: comprimento total de 15 mm (distância correspondente entre os centros dos olhais), comprimento útil da ordem de 10 mm (totalizando 40 espiras), diâmetro externo de 1,25 mm e diâmetro do fio de 0,25 mm. Na embalagem dessas mini molas o fabricante informa uma força máxima correspondente a 200 gramas ($\sim 2N$).

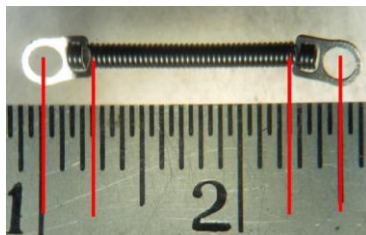


Figura 1. Fotografia ao microscópio da mini mola de Ni-Ti com o comprimento deformável e total em destaque.

2.2. Treinamento Cíclico

Para estabilizar o comportamento eletromecânico das mini molas da Fig.1 foi realizado um treinamento cíclico utilizando-se o dispositivo mostrado na Fig. 2. Para esse processo, a mini mola foi submetida à uma carga mecânica da ordem de 2 N, correspondente a uma massa de 200 gramas, e aquecida por efeito Joule por uma corrente elétrica constante de 430 mA. O resfriamento foi realizado por convecção natural, com a temperatura do ambiente mantida em torno de 22 °C. Foram realizados 2000 ciclos cada um deles com duração de 15 segundos, sendo aproximadamente 5 s para o aquecimento (tempo necessário para que a mini mola atingisse sua contração máxima sob a carga de 2 N) e 10 s para o resfriamento (tempo necessário para que a mola resfriasse e se distendesse totalmente).



Figura 2. Montagem específica utilizada para o treinamento cíclico da mini mola de LMF Ni-Ti.

2.3. Plataforma Experimental

Para a análise detalhada do comportamento eletromecânico dos atuadores do tipo mini molas helicoidais de Nitinol[®] da Fig.1 sob carregamento mecânico e com ativação por meio de corrente elétrica controlada (aquecimento por efeito Joule) foi necessária a construção de uma plataforma experimental capaz de submeter a mini mola em análise a uma carga mecânica constante (peso) e sinais de corrente elétrica variáveis com o tempo, de tal forma que fosse capaz de monitorar o comportamento da resistência elétrica e do deslocamento em cada etapa do aquecimento e resfriamento (por diminuição da corrente em convecção natural).

A estrutura mecânica que suporta a mini mola foi construída de uma maneira que esse elemento miniaturizado seja instalado na vertical sob ação de um peso instalado em uma bandeja na qual a haste de um sensor de deslocamento LVDT está fixada. A base do LVDT foi instalada na estrutura de uma maneira que a sua haste não causa atrito com o movimento de contração e distensão da mini mola, conforme pode ser observado na Fig. 3.

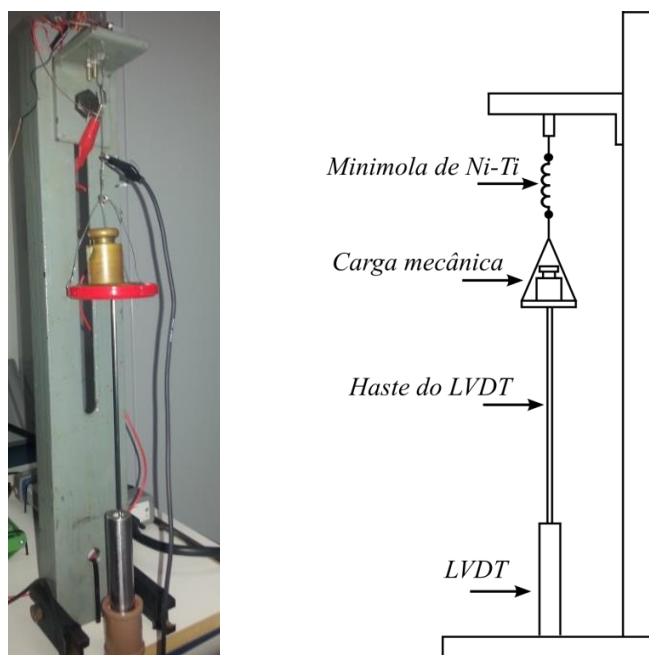


Figura 3. Imagem e respectivo desenho esquemático da estrutura mecânica com uma mini mola de LMF Ni-Ti instalada para testes.

Após inúmeros testes preliminares de verificação do funcionamento do sistema da Fig. 3, com várias formas de onda, foi estabelecido que a forma do sinal de corrente mais adequada para ativação da mini mola de LMF Ni-Ti corresponde a uma onda triangular, com uma frequência lenta o bastante para que esse atuador atinja contração máxima no aquecimento, e distensão máxima no resfriamento, quando submetida a um carregamento mecânico constante.

De modo geral, a montagem da plataforma experimental pode ser esquematizada conforme o diagrama em blocos da Fig. 4.

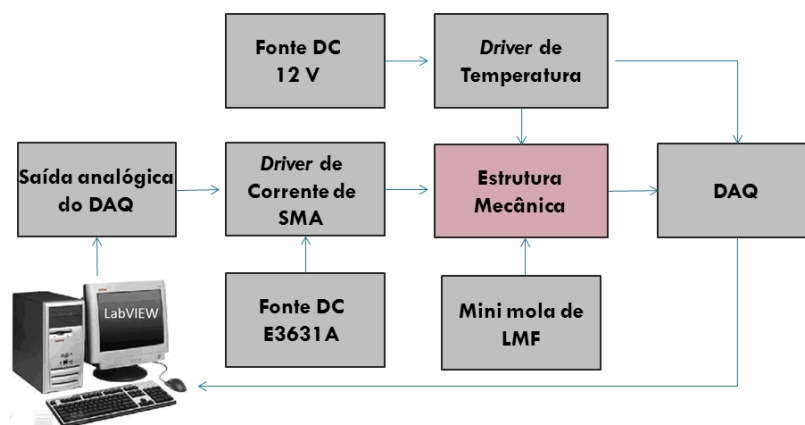


Figura 4. Diagrama de blocos representando o esquema de funcionamento da plataforma experimental.

A forma de onda da corrente elétrica triangular, utilizada para o aquecimento da mini mola, é gerada com o auxílio do programa *LabVIEW* e enviada para um circuito de condicionamento de sinal (*driver* de corrente de SMA), através de uma saída analógica do DAQ. O DAQ é um módulo de aquisição de dados (DAQ) série M da *National Instruments*.

Por sua vez, o *driver* de corrente de SMA (LMF), cujo esquema eletro eletrônico é mostrado na Fig. 5, permite que a corrente elétrica da fonte de alimentação (Agilent, E3631A) seja controlada de acordo com o sinal programado no *LabVIEW*.

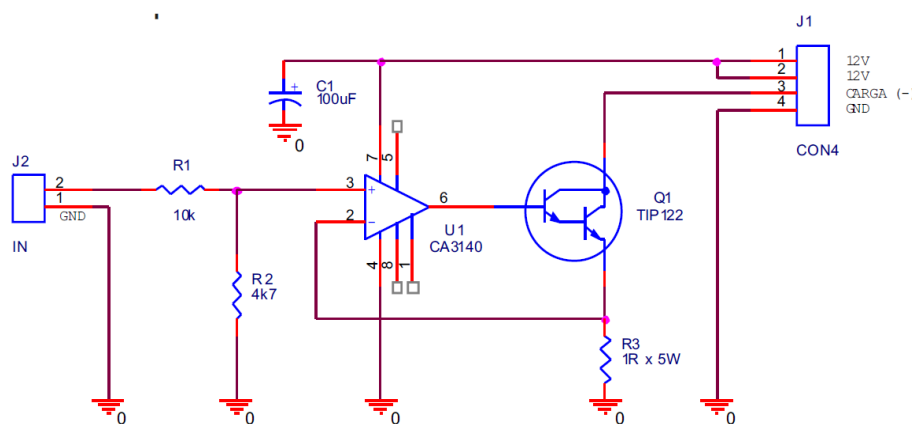


Figura 5. Driver de corrente de SMA (LMF).

A partir de canais de entrada analógica do DAQ são lidos os sinais de tensão elétrica, corrente elétrica, e deslocamento da mini mola.

No *LabVIEW* foi desenvolvida uma rotina capaz de gerar um sinal de corrente triangular simétrico no DAQ. Foi possível ajustar facilmente os valores da amplitude, *offset*, frequência e fase, de modo a escolher os melhores parâmetros da onda para cada experimento a ser realizado, além de uma rotina para monitorar, em tempo real, os sinais de deslocamento, tensão elétrica e corrente elétrica na mini mola.

Os experimentos de ciclagem eletromecânica foram realizados com a mini mola submetida aos pesos padrões de 200 g, 150 g e 100 g, somados as massas da haste do LVDT e da bandeja que acomoda os pesos padrões (aproximadamente 30 g). Logo, as forças peso a qual a mini mola esteve sujeita foram: 1,28 N (130 g); 1,77 N (180 g) e 2,26 N (230 g).

Para cada nível de carga constante aplicada foram usados valores diferentes para o pico da onda de corrente elétrica triangular. Para a carga de 2,26 N (230 g) utilizou-se um valor de pico de 350 mA, para 1,77 N (180 g) foi usado 275 mA, e para 1,28 N (130 g) empregou-se 220 mA. Esse aumento de corrente com aumento da carga aplicada está relacionado com a Lei de Clausius-Clayperon para LMF (Otuska & Wayman, 1998), e é necessário pois quanto maior a carga aplicada, maior será a temperatura necessária atingir para realizar a transformação de fase no material e o consequente EMF (contração sob carga).

Além disso, para cada sinal triangular, foram utilizadas duas taxas de variação da corrente elétrica, correspondentes a 6 e 12 mA/s, para que fosse possível uma análise mais detalhada da resposta eletromecânica da mini mola de LMF. A eventual influência desse parâmetro será discutida posteriormente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente, é importante salientar que molas são elementos de máquina em que as tensões predominantes são do tipo cisalhante, que se apresentam sob forma de gradiente na seção transversal do fio constituinte da mola, sendo máxima na superfície externa e zero no centro da seção (Grassi, 2014). Por esta razão, não se fala de tensão mecânica sobre a mini mola e sim de força externa aplicada.

No decorrer do texto serão utilizados os símbolos di/dt e P para representar o valor da taxa de variação da corrente elétrica e o peso ao qual a mini mola de LMF está submetida, respectivamente.

Os ensaios de EMF sob carga realizados permitiram avaliar o comportamento eletromecânico dos atuadores. Assim, foi analisado o comportamento da relação entre deslocamento e resistência elétrica, visando verificar a possível existência de uma relação linear sem histerese entre estes dois parâmetros, algumas vezes observada em fios finos de LMF Ni-Ti sob carga constante e variação de temperatura (De Araújo et al, 1999; Nascimento et al., 2006).

Na Figura 6 é possível observar a evolução temporal do deslocamento da mini mola para os primeiros 5 ciclos de trabalho mecânico e ambas as taxas de variação de corrente elétrica. O ponto inicial desse gráfico (deslocamento zero) foi considerado como referência e corresponde a mini mola em repouso submetida a carga mecânica, e na temperatura ambiente. Para a taxa de 6 mA/s, constata-se o movimento cíclico da mini mola de LMF Ni-Ti evidenciado pela variação dos deslocamentos de contração e distensão cujas amplitudes variam de um mínimo de aproximadamente 3 mm para $P = 1,28$ N e $I_{máx} = 220$ mA até um máximo de 23 mm para $P = 2,26$ N e $I_{máx} = 350$ mA. Assim, quanto maior a carga aplicada maior será realização de trabalho mecânico, correspondente a distensão e contração do atuador.

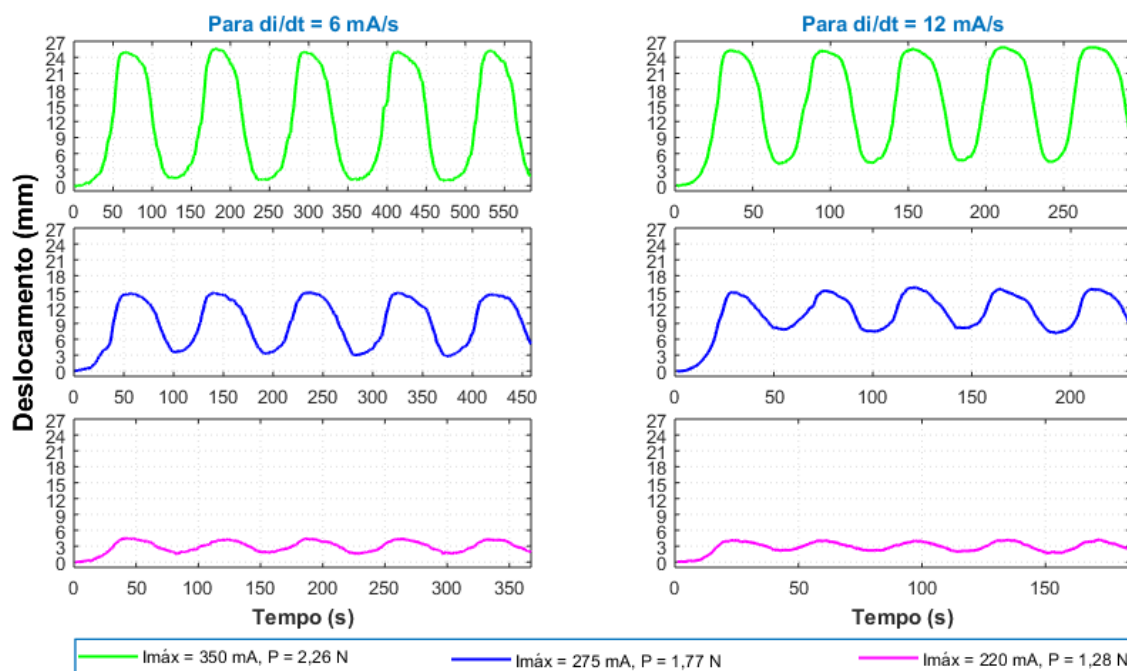


Figura 6. Evolução temporal do deslocamento da mini mola de Ni-Ti.

Na Figura 7 apresenta-se o comportamento da resistência elétrica absoluta para cada uma das situações estudadas (Fig. 6). Verifica-se que o maior valor de resistência elétrica ocorre quando a mini mola está na temperatura ambiente e sob carga mecânica em repouso, ou seja, o valor mais elevado do primeiro ciclo termomecânico. A resistência elétrica diminui de valor quando a mini mola se encontra em processo de contração (no aquecimento) e aumenta quando em processo de distensão (no resfriamento). Este fenômeno é explicado por que a contração da LMF (transformação da fase martensita para austenita, neste caso) causa naturalmente a diminuição da resistência elétrica (Otsuka & Wayman, 1998; De Araújo et al, 1999; Nascimento et al., 2006). O comportamento oposto também é válido, ou seja, a distensão da mini mola (transformação da fase austenita para martensita) causa um aumento na resistência elétrica (Furst, Seelecke, 2014).

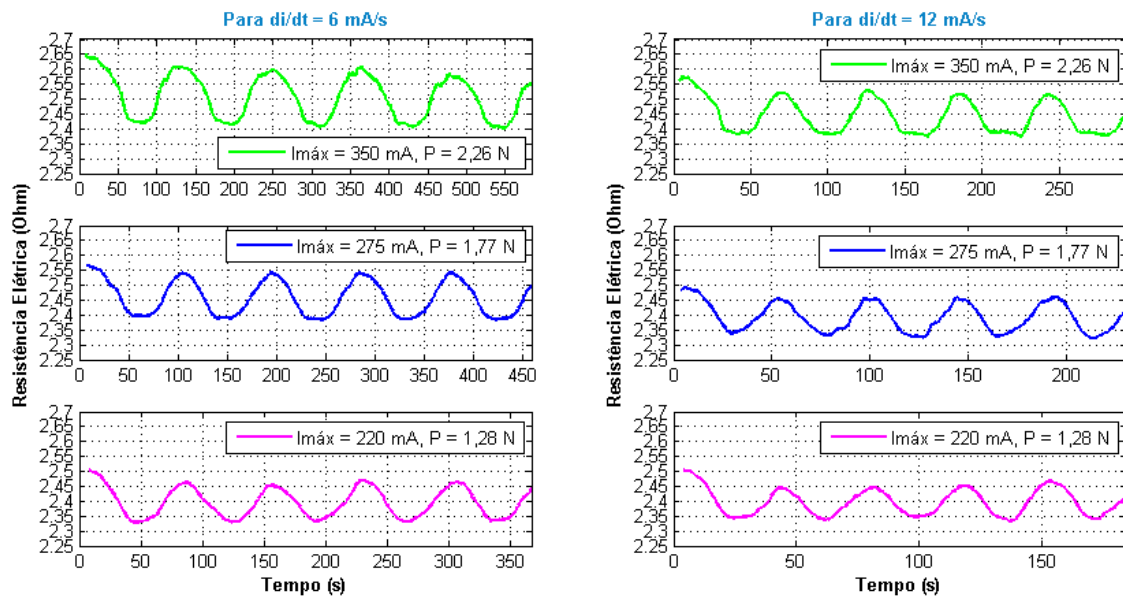


Figura 7. Evolução temporal da resistência elétrica da mini mola de LMF Ni-Ti.

A partir da observação da Fig. 8 é possível avaliar o comportamento do deslocamento em função da resistência elétrica para as três cargas distintas, eliminando a variável tempo nessa análise. Este resultado foi obtido para os primeiros 25 ciclos térmicos de trabalho mecânico. Essa relação foi usada recentemente em uma aplicação de dispositivo médico (Furst, Seelecke, 2012). Constata-se um comportamento quase linear e praticamente sem histerese, sendo possível observar que quanto maior a carga aplicada maior será a histerese dessa relação. Adicionalmente, para a taxa $di/dt = 6$ mA/s a histerese é um pouco mais larga quando comparada com a taxa mais rápida, de $di/dt = 12$ mA/s. Em todos os resultados é possível observar uma região linear no aquecimento (contração) e outra no resfriamento (distensão), praticamente sem histerese para as cargas de 1,28 N e 1,77 N.

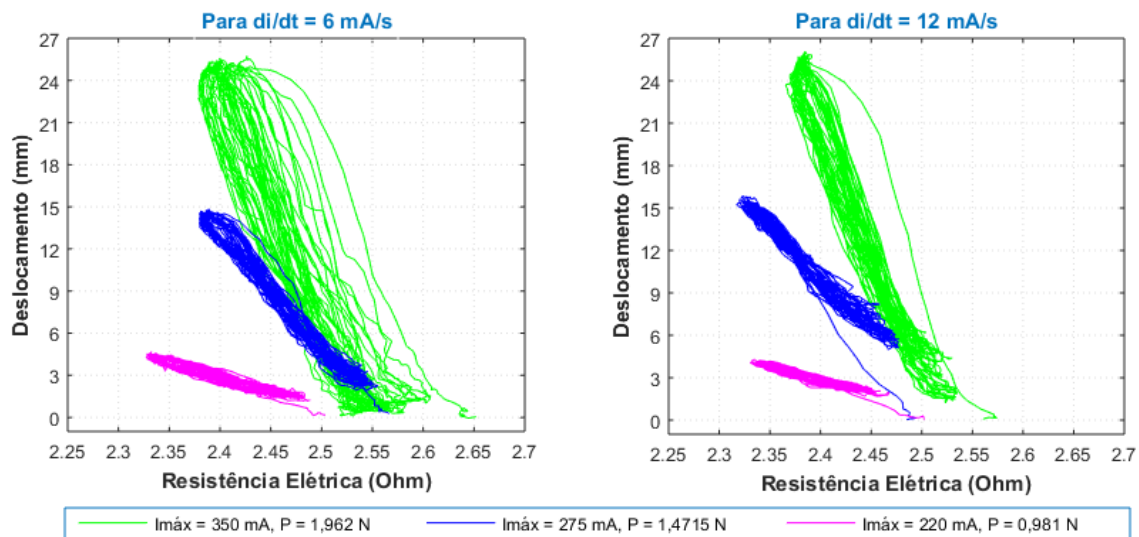


Figura 8. Comportamento do deslocamento da mini mola de LMF em função da resistência elétrica para as taxas de variação de corrente elétrica de 6 e 12mA/s.

Foi constatado também que quanto menor a carga mecânica a qual a mini mola de LMF está submetida, menor será a histerese dessa relação, permitindo o controle de algum mini sistema eletromecânico que incorpore as mini molas estudadas nesta pesquisa (por exemplo, uma aplicação na robótica). Para isso seria necessário calcular o coeficiente de inclinação da reta correspondente à relação linear deslocamento *versus* resistência elétrica. No caso da carga de 1,28 N para uma $di/dt = 12$ mA/s, esse coeficiente tem o valor de -22,12 mm/ohm, calculado a partir da média do coeficiente angular de cada um dos ciclos. Esse resultado significa que uma variação de 0,045 ohm na resistência elétrica corresponde a um deslocamento de 1 mm na mini mola.

Na Figura 9 apresenta-se o protótipo de um robô *Inchworm* ABS-SMA, uma das aplicações em desenvolvimento no contexto do projeto *SMArt Robots* no LaMMEA/UFCG, em que se vem utilizando as mini molas de LMF Ni-Ti

estudadas nessa pesquisa. Espera-se que a relação linear e não histerética entre deslocamento e resistência elétrica das mini molas Ni-Ti (Fig. 8) possa contribuir para o desenvolvimento de um sistema de controle para essas estruturas flexíveis.

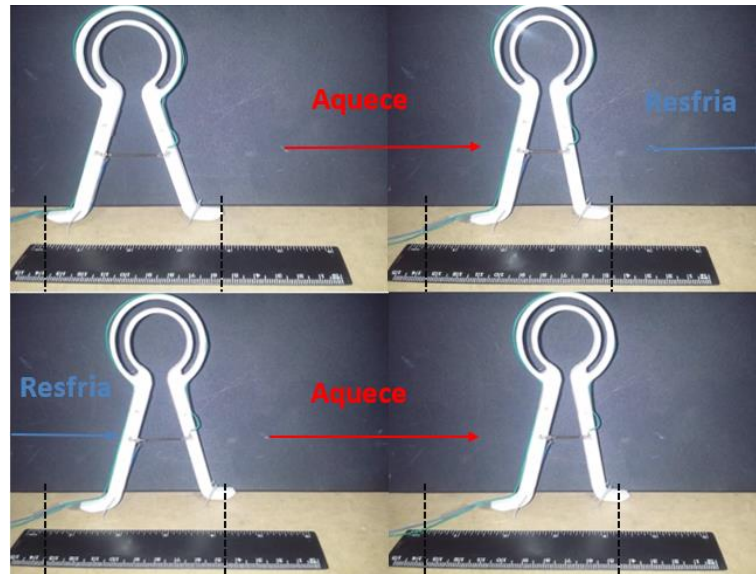


Figura 9. Protótipo de robô Inchworm ativado por mini molas de LMF Ni-Ti em desenvolvimento no LaMMEA/CCT/UFCG.

4. CONCLUSÕES

No estudo do comportamento das LMF em geral, a resistência elétrica é uma propriedade de bastante interesse, pois apresenta valores distintos para cada fase de transformação (austenita e martensita), o que significa que esse valor reflete a quantidade de martensita (ou austenita) para determinadas condições (temperaturas e cargas, por exemplo).

A relação do deslocamento em função da resistência elétrica exibiu um comportamento praticamente linear no aquecimento e no resfriamento, com uma histerese estreita. Essa linearidade praticamente não histerética é bastante interessante, pois pode permitir o controle da posição da mini mola de LMF apenas monitorando a resistência elétrica, independentemente de o atuador estar sendo aquecido ou resfriado em um determinado instante. No que diz respeito ao nível de carga mecânica aplicado, foi observado que para cargas menores a histerese dessa relação foi menor quando comparada as cargas maiores. Dessa forma, para cargas inferiores a carga nominal indicada para a mini mola (1,962 N), que levam a amplitudes de deslocamento situadas entre aproximadamente 3 mm e 10 mm, constatou-se resultados mais suscetíveis à obtenção dessa relação linear e a consequente realização de controle para uma aplicação na área da robótica, por exemplo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento dos seguintes projetos: INCT de Estruturas Inteligentes em Engenharia (Processo nº 574001/2008-5), Casadinho UFCG-UFRJ-ITA (Processo nº 552199/2011-7), Universal 14/2012 (Processo nº 474524/2012-4), CT-Aeroespacial 22/2013 (Processo nº 402082/2013-3) e PQ 1D (Processo nº 304658/2014-6). Agradecemos também a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro e a bolsa de estudo (Mestrado) a este projeto de pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- An, S., Ryu, J., Cho, M.; Cho, K., 2012, "Engineering Design Framework for a Shape Memory Alloy Coil Spring Actuator Using a Static Two-State Model", *Smart Materials and Structures*, Vol. 21, n. 5, p. 055009.
- de Araújo, C. J., Morin, M., Guénin, G., 1999, "Electro-thermomechanical behaviour of a Ti-45.0Ni-5.0Cu (at.%) alloy during shape memory cycling", *Materials Science & Engineering. A*, Vol. 273-275, pp. 305-309.
- Furst, S. J., Seelecke, S., 2014, "Fabrication and Characterization of a Dual-Joint Smart Inhaler nozzle Actuated by Embedded SMA Wires", *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, n. 3, pp. 035008.
- Furst, S. J., Seelecke, S., 2012, "Modeling and Experimental Characterization of the Stress, Strain, and Resistance of Shape Memory Alloy Actuator Wires with Controlled Power Input", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 23, n. 11, pp. 1233-1247.

- Grassi, E. N. D., 2014, “Comportamento Termomecânico de Minimolas Superelásticas de NiTi: Influência de Tratamentos Térmicos”, Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação da UFCG. Departamento de Engenharia Mecânica. Campina Grande - PB.
- Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., Gibson, M. A., 2014, “A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities”, *Materials & Design*, Vol. 56, pp. 1078–1113.
- Nascimento, M. M. S. F., De Araújo, C. J., Rocha Neto, J. S., Lima, A. M. N., 2006, “Electro-thermomechanical characterization of Ti-Ni shape memory alloy thin wires”. *Materials Research*, São Carlos - SP, Vol. 9, n.1, pp. 15-19.
- Otsuka, K., Wayman, C.M., 1998, “Shape Memory Materials.”, Cambridge University Press. ISBN 0 521 663849.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE ELECTROMECHANICAL BEHAVIOR OF Ni-Ti SUPERELASTIC MINI SPRINGS WORKING IN SHAPE MEMORY EFFECT UNDER CONSTANT LOAD

Roana d'Ávila Souza Monteiro, roana.davila@gmail.com¹
Eisenhower de Moura Fernandes, eisenhower@ee.ufcg.edu.br¹
Carlos José de Araújo, carlos.araujo@ufcg.edu.br¹

¹Universidade Federal de Campina Grande, Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA), Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Av. Aprígio Veloso, 882 – Bairro Universitário, CEP: 58429-140, Campina Grande - PB

Abstract. *The shape memory alloys (SMA) constitute a class of metallic materials that have the ability to recover a pseudo-plastic deformation introduced by applying a mechanical load, and return to its original shape by a simple heating. Additionally, the main interest in SMA actuators in the form of coil springs lies in the large displacement provided by the shape memory effect (SME) phenomenon, which allows performing mechanical work when the component is subjected to varying conditions of temperature and mechanical load. In the case of SMA elements in a state of superelasticity (SE) at room temperature, when mechanical load is applied and maintained on the material, the strain caused by the formation of stress induced martensite can be reversed by heating. In this case, we have a SME in a SMA element originally superelastic. The objective of this study is to evaluate the displacement behavior with the variation of electrical resistance in mini SMA springs Ni-Ti system. For this, an experimental platform to submit the mini spring to a constant mechanical load (weight) and the excitement electric current variable with time to promote the Joule heating was developed. An almost linear and without hysteresis between the variation of the displacement and the change in electrical resistance was observed in the heating and cooling of the SMA mini spring. This behavior is important because it may allow control of the mini SMA spring position only monitoring the electrical resistance, regardless of this actuator being heated or cooled at a given moment.*

Keywords: Ni-Ti alloys, Nitinol, Mini coil springs, Superelasticity, Electromechanical characterization.