



**COBENGE 2005**

**XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia**

"Promovendo e valorizando a engenharia em um cenário de constantes mudanças"

12 a 15 de setembro - Campina Grande - Pb

Promoção/Organização: ABENGE/UFCG-UFPE

## **DESENVOLVIMENTO E TESTES DE UMA BANCADA EXPERIMENTAL SIMPLES PARA CARACTERIZAÇÃO ELETROMECHANICA DE FIOS ATUADORES COM MEMÓRIA DE FORMA**

**Igor Solva Teixeira de Lima** – [lima\\_igor@yahoo.com.br](mailto:lima_igor@yahoo.com.br)

Estudante de Graduação em Engenharia Mecânica

Universidade Federal de Campina Grande

Departamento de Engenharia Mecânica

Caixa Postal: 10069

Cep: 58109-970, Campina Grande - PB

**Niedson José da Silva** – [niedsonjs@yahoo.com.br](mailto:niedsonjs@yahoo.com.br)

Estudante de Graduação em Engenharia Mecânica

**Sandro Lino Moreira de Queiroga** – [linoqueiroga@yahoo.com.br](mailto:linoqueiroga@yahoo.com.br)

Mestrando em Engenharia de Materiais

**Carlos José de Araújo** – [Carlos@dem.ufcg.edu.br](mailto:Carlos@dem.ufcg.edu.br)

Professor Adjunto IV

**Resumo.** Atuadores de ligas com memória de forma (LMF) vêm encontrando aplicações crescentes no domínio da engenharia em virtude da capacidade que demonstram de lembrar uma forma previamente estabelecida quando submetidos a uma variação de temperatura. Esta recuperação de forma, a qual corresponde um deslocamento, é acompanhada de uma histerese em temperatura que precisa ser determinada quando se vislumbram aplicações destes materiais como elementos senso-atuadores. Para tal finalidade, foi projetada uma estrutura mecânica que visa permitir a aplicação de cargas uniaxiais constantes, por intermédio de pesos, em amostras de fios finos com memória de forma. A ciclagem elétrica (aquecimento e resfriamento) das amostras é realizada utilizando uma fonte de potência CC trabalhando em modo de corrente constante, enquanto a deformação é medida usando um sensor de deslocamento do tipo LVDT. Os ensaios realizados com amostras de fios de uma liga Ti-Ni-Cu de 0,29mm de diâmetro mostraram que, com o aumento da carga aplicada ao fio, observa-se um aumento do efeito memória de forma assim como dos níveis de corrente correspondentes às temperaturas de transformação do material. A análise dos laços deslocamento – corrente permitiu medir um EMF sob carga situado entre 3,3 e 4,5% para cargas aplicadas na faixa de 10 a 188MPa. Para essa mesma faixa de carregamento, verificou-se que a corrente necessária para contrair o fio EMF totalmente ( $i_{Af}$ ) situa-se entre 0,35 e 0,45A.

**Palavras-chaves:** Ligas com memória de forma, efeito memória de forma, histerese, atuadores, materiais inteligentes.

## 1. INTRODUÇÃO

Ligas com efeito memória de forma (LMF) são materiais metálicos especiais que possuem a surpreendente capacidade de recuperar uma deformação plástica ou “aparentemente plástica” por intermédio de um aquecimento subsequente acima de uma temperatura dita crítica. Este fenômeno é intimamente associado a uma transformação de fase do tipo martensítica, cristalograficamente reversível (Otsuka & Wayman, 1998). A deformação é introduzida na fase de baixa temperatura (martensita) e um simples aquecimento transforma o material para a fase de alta temperatura (austenita) resultando na recuperação da forma. Quando uma força externa é aplicada e mantida constante, como por exemplo, através de um peso, um efeito memória de forma de duplo sentido (*two-way memory effect*) pode ser obtido. Assim, uma liga com EMF pode ser considerada intrinsecamente como um atuador termomecânico que converte energia térmica em deslocamento acompanhado ou não da produção de um trabalho mecânico. Em geral, o deslocamento desejado é obtido através da aplicação de pulsos de corrente elétrica (efeito Joule) e neste caso o material é considerado um “atuador elétrico”. Este modo de acionamento elétrico vem sendo freqüentemente utilizado em protótipos de robôs para aplicações diversas (Duerig et al., 1990; Furuya & Shimada, 1990). Porém, se o acionamento (aquecimento e resfriamento) é realizado por intermédio da variação controlada da temperatura ambiente (convecção forçada, por exemplo), o material é considerado um “atuador térmico”. A resposta em deslocamento apresentada por esses materiais é não linear e acompanhada de uma histerese em temperatura.

Este trabalho tem a finalidade de desenvolver e testar uma bancada experimental simples para determinação da característica histerética deslocamento – corrente elétrica de fios atuadores de ligas com memória de forma em função da carga externa.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Projeto Conceitual e Montagem da Bancada Experimental

O projeto conceitual da estrutura mecânica de teste para fios com memória de forma foi baseado na minimização das operações de usinagem para fabricação das partes componentes através do emprego de produtos semi-acabados tais como perfis estruturais, parafusos, presilhas, dentre outros. Ficou estabelecido também que as amostras a serem testadas deveriam ficar submetidas a um estado de tensão tratativa uniaxial constante, semelhantemente a máquina MF-2 desenvolvida por De Araújo *et al* (2000). Neste contexto, foram definidos os parâmetros que influenciam nas dimensões da estrutura mecânica da máquina de teste, como o comprimento e diâmetro do fio a ser testado, a carga máxima a ser aplicada e o tamanho do sensor de deslocamento LVDT para medir a contração e expansão da amostra. Foi estimado um comprimento da amostra da ordem de 100mm e diâmetro máximo de aproximadamente 0,5mm, além de uma carga máxima correspondente a uma massa de 3kg aplicada na amostra. O sensor de deslocamento selecionado foi do tipo LVDT, marca Solartron, modelo DC miniature DF5, com comprimento de 43mm e diâmetro de 19mm, tendo uma capacidade de leitura de 10mm. O AUTOCAD 3D foi utilizado para realizar o desenho e permitir uma visão geral em perspectiva do protótipo projetado. Uma vez estabelecido o protótipo, incluindo a seleção dos materiais, se iniciou a confecção e montagem das partes da máquina. A Figura 1 mostra o projeto conceitual da máquina em AUTOCAD 3D acompanhada do protótipo efetivamente montado em laboratório.

O protótipo da Figura 1(b) possui duas tampas corrediças de acrílico nas partes frontal e traseira visando eliminar a possibilidade de circulação de ar em torno da amostra de fio EMF a ser testada. O detalhamento do projeto pode ser encontrado em Lima (2004).

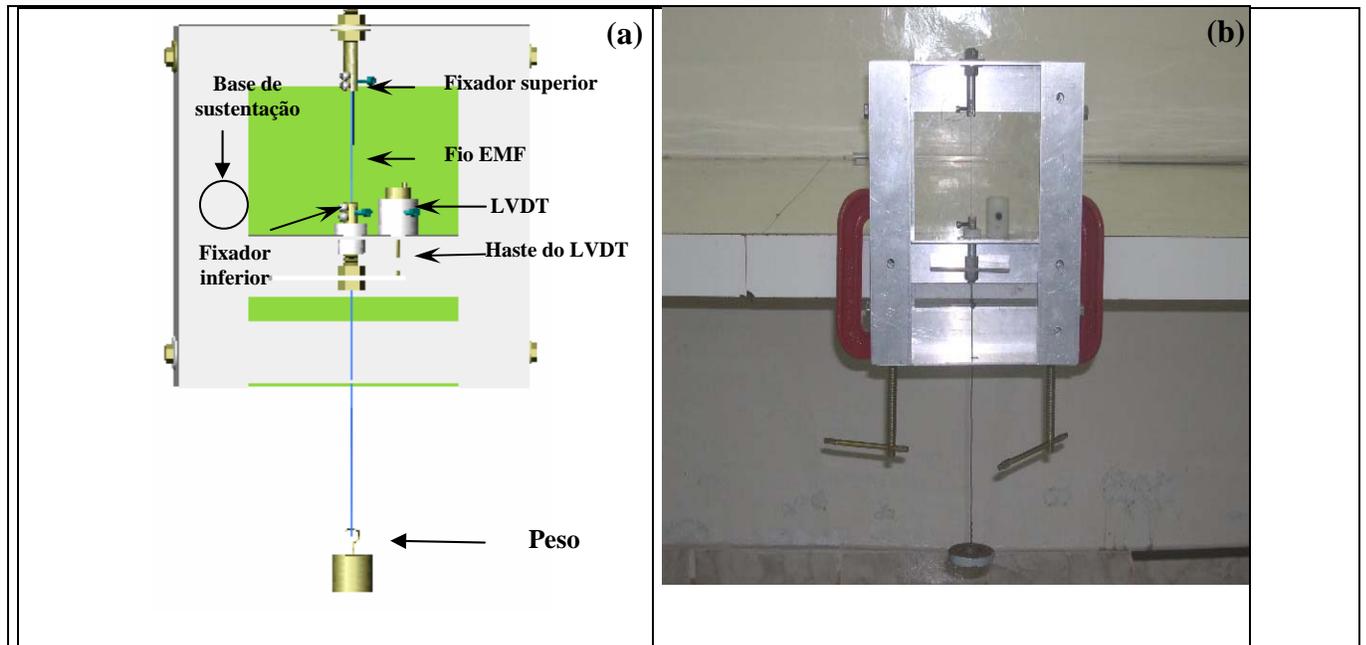


Figura 1. Máquina de teste para caracterização de fios com EMF. (a) Projeto conceitual em AUTOCAD 3D. (b) Protótipo montado em laboratório.

## 2.2 Protocolo de Testes

Para a realização dos testes com a máquina mostrada na Figura 1(b) foi utilizada uma amostra de fio EMF da liga Ti-45,0Ni-5,0Cu (%peso) com 100mm de comprimento e 0,29mm de diâmetro. Essa amostra foi previamente treinada através da realização de 100 ciclos de aquecimento-resfriamento elétrico sob uma carga constante correspondente a uma massa de 1kg. Durante os testes, os ciclos de aquecimento-resfriamento foram realizados por intermédio de uma fonte de potência CC marca Agilent, modelo E3633A trabalhando em modo de corrente constante e instalada ao lado da estrutura da Figura 1(b). Os fios elétricos de interligação foram conduzidos da fonte de alimentação até os conectores elétricos instalados no fixador inferior e superior, ambos ilustrados na Figura 1(a). A corrente passando através da amostra foi aumentada gradativamente em etapas de 10mA até um valor máximo dependente da carga externa e reduzida de maneira idêntica até zero para finalizar um ciclo completo. Para cada valor de carga externa, a corrente máxima foi determinada experimentalmente e definida como aquela que leva uma estabilização da leitura do sensor LVDT que mede a contração e alongamento do fio EMF. A carga máxima aplicada à amostra foi da ordem de 188MPa. Para cada valor de carga aplicada foi construída uma tabela de dados contendo a corrente elétrica e a tensão na amostra, além da tensão na saída do sensor LVDT. O sensor LVDT foi previamente calibrado para obtenção de sua relação linear característica, conforme indica a Figura 2. Na Figura 2(a) verifica-se que a calibração foi realizada utilizando um parafuso micrométrico de precisão. Para cada volta completa do parafuso, correspondente a 0,5mm, mediu-se a tensão de saída, resultando no

comportamento linear da Figura 2(b) que permite converter o sinal em volts do sensor em deslocamento em mm de sua haste móvel.

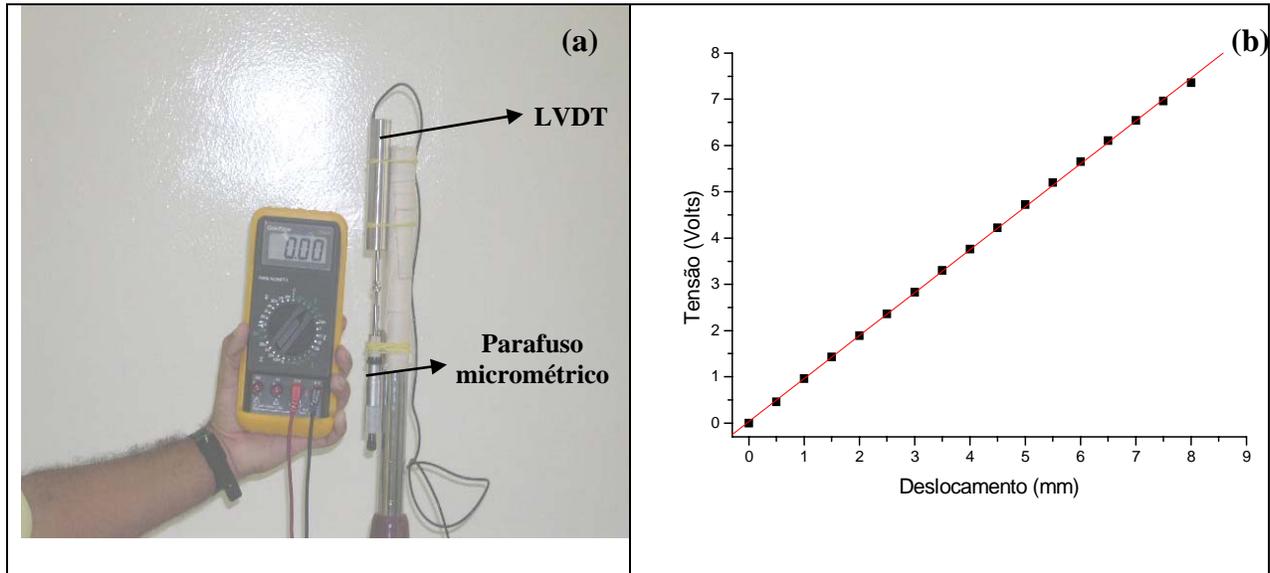


Figura 2. Calibração do sensor LVDT. (a) Deslocamento da haste usando um parafuso micrométrico. (b) Relação linear obtida para o deslocamento da haste em função da tensão de saída.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 mostra as curvas tensão – corrente relativas à ciclagem da amostra de fio EMF para dois níveis de carga assim como o deslocamento obtido em função da corrente elétrica de ativação. Na Figura 3(a) constata-se uma anomalia histerética no comportamento tensão – corrente, a qual ocorre devido à transformação de fase da amostra que origina o comportamento em EMF mostrado na Figura 3(b). Para um condutor metálico clássico, isto é, que não apresenta transformação de fase durante aquecimento e resfriamento, o comportamento tensão – corrente seria retilíneo e sem histerese.

A Figura 3(b) revela um aumento da amplitude (altura) dos laços de histerese corrente – deslocamento assim como a necessidade de correntes mais altas de ativação quando do aumento da carga aplicada. O aumento da altura dos laços corresponde a um aumento do EMF que ocorre devido a melhor orientação das variantes de martensita produzida pelas cargas mais altas. Semelhantemente, cargas aplicadas de maior intensidade levam a uma necessidade de maior densidade de energia para transformar o material, explicando assim o aumento de corrente em função da carga para cada curva de aquecimento mostrada na Figura 3(b). A Figura 3(b) revela também três comportamentos distintos. Para cargas de pequena intensidade como 10MPa, o laço de histerese não se fecha após um ciclo completo, restando uma deformação residual sob carga correspondente a aproximadamente 0,6mm. Isso ocorre devido ao fato de o carregamento aplicado não produzir uma orientação ótima das variantes de martensita durante o resfriamento, impossibilitando o completo retorno ao ponto de partida do aquecimento. Para cargas de média intensidade como 84MPa, observa-se que o laço corrente – deslocamento se fecha completamente indicando uma orientação ótima de variantes de martensita no interior do material para esse nível

de carregamento. Por outro lado, carregamentos de mais elevada magnitude como 188MPa produzem, além de uma boa orientação de variantes de martensita, uma deformação plástica residual ( $\sim -0,3\text{mm}$ ) que corresponde a um aumento de comprimento da amostra sob carga.

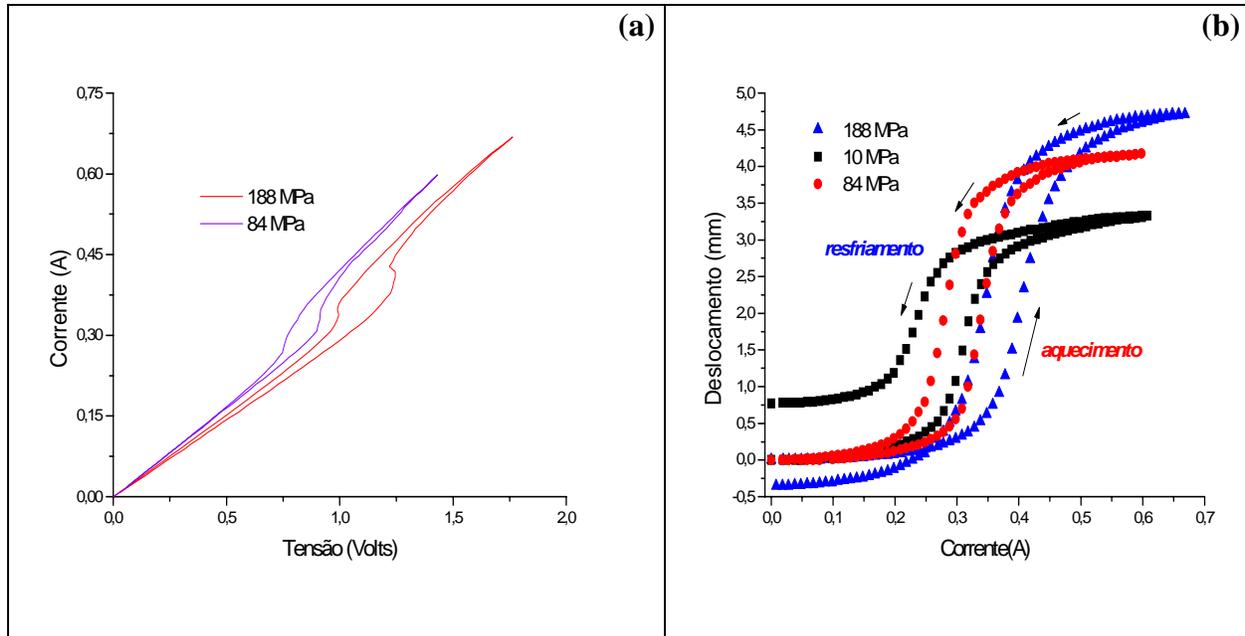


Figura 3. Ativação elétrica e resposta em deslocamento da amostra testada. (a) Curva de aquecimento e resfriamento tensão – corrente. (b) Contração e alongamento da amostra em função da corrente elétrica durante aquecimento e resfriamento.

É importante salientar que vários parâmetros importantes podem ser obtidos a partir das curvas corrente – deslocamento da Figura 3(b), tais como o EMF sob carga e os níveis de corrente elétrica correspondentes as temperaturas de transformação do material. Esses parâmetros são definidos e obtidos conforme ilustrado na Figura 4. O EMF sob carga corresponde à máxima contração durante o aquecimento, enquanto os níveis de corrente  $i_{Mf}$ ,  $i_{Ms}$ ,  $i_{As}$  e  $i_{Af}$  correspondem, respectivamente, as temperaturas de transformação martensítica  $M_f$ ,  $M_s$ ,  $A_s$  e  $A_f$  definidas na literatura e obtidas pelo método das tangentes (Otsuka & Wayman, 1998).

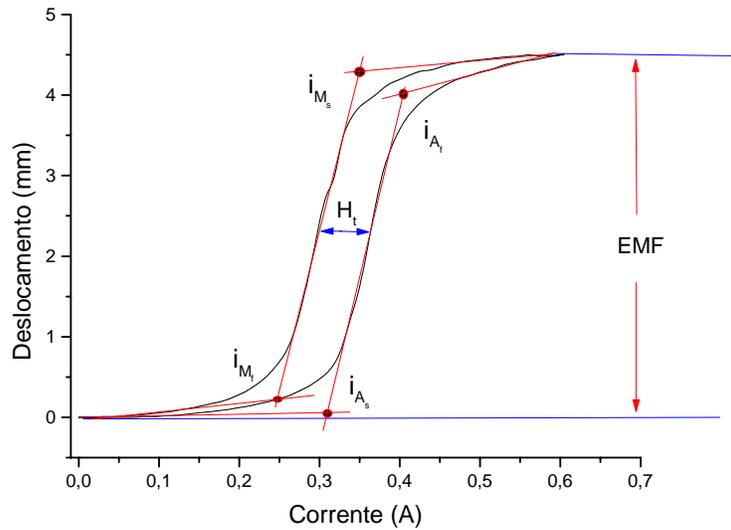


Figura 4. Definição de parâmetros relativos ao EMF da amostra a partir dos laços corrente – deslocamento.

A Figura 5 revela o comportamento dos parâmetros definidos na Figura 4 em função da carga aplicada. Na Figura 5(a) verifica-se um aumento com tendência de saturação do EMF em função da carga externa. Considerando que o comprimento da amostra é da ordem de 100mm, constata-se que para a faixa de carregamento estudada (10 a 188MPa) o EMF situou-se entre 3,3 e 4,5%. Além disso, lembrando que a amostra foi previamente “treinada”, é possível estimar o EMF sem carga (“*two-way memory effect*”) a partir da curva da Figura 5(a). Uma extrapolação desse comportamento para 0MPa leva a um EMF sem carga da ordem de 3%. Como a cada nível de corrente elétrica corresponde uma temperatura (Nascimento *et al*, 2004), a Figura 5(b) permite constatar o aumento linear de todas as correntes críticas correspondentes às temperaturas de transformação. Este comportamento é típico das ligas com memória de forma (Otsuka & Wayman, 1998).

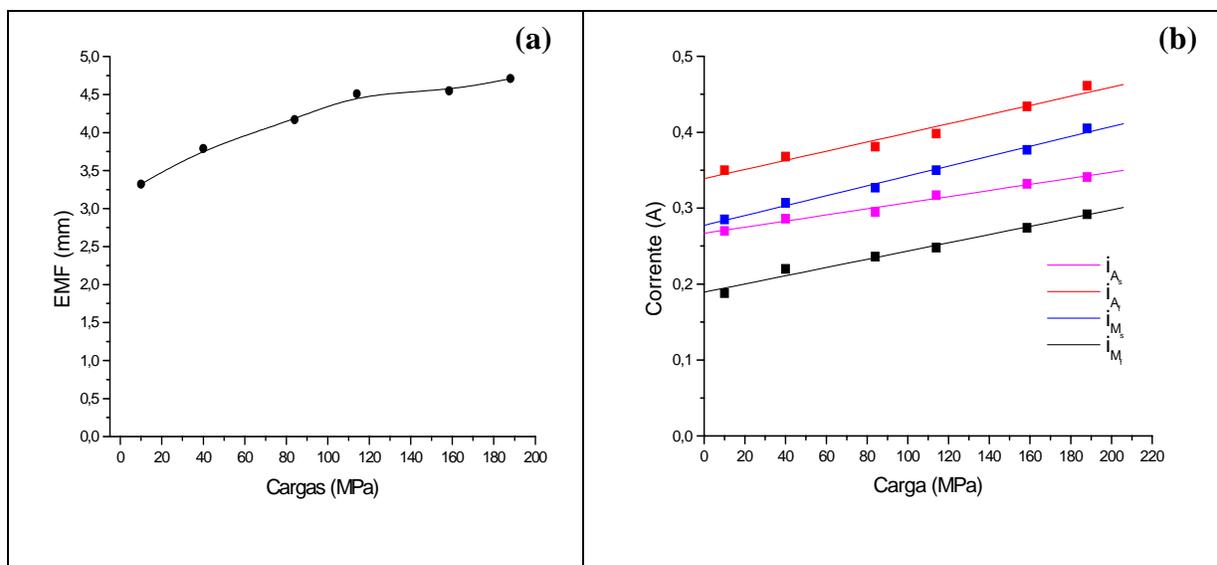


Figura 5. Parâmetros da figura 3 em função da carga aplicada. (a) EMF sob carga. (b) Correntes de transformação.

#### 4. CONCLUSÕES

O projeto e construção da máquina de teste permitiram quantificar experimentalmente algumas das propriedades mais importantes de fios com EMF trabalhando sob carregamento trativo uniaxial. Foi observado que a curva tensão – corrente correspondente ao aquecimento e resfriamento da amostra de fio EMF apresenta uma anomalia histerética intimamente relacionada à transformação de fase reversível responsável pelo fenômeno de memória de forma. O aumento da carga externa aplicada à amostra resultou no aumento das amplitudes dos laços de histerese corrente – deslocamento, assim como nos níveis de corrente elétrica responsáveis pela contração do fio EMF durante aquecimento. A análise dos laços *corrente – deslocamento* permitiu medir um EMF sob carga situado entre 3,3 e 4,5% para cargas aplicadas na faixa de 10 a 188MPa. Para essa mesma faixa de carregamento, verificou-se que a corrente necessária para contrair o fio EMF totalmente ( $i_{Af}$ ) situa-se entre 0,35 e 0,45A. Esses resultados demonstram o potencial de utilização do equipamento concebido para o estudo desses materiais especiais.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e ao programa PIBIC-UFCG pela concessão da bolsa de Iniciação Científica ao aluno Igor S. T. de Lima, assim como os apoios financeiros recebidos do CNPq/CT-Energ através do processo 400724/2003-0 e da FAPESQ-PB/CNPq através do projeto PPP 035/03.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DE ARAÚJO, C. J.; BIJEON, M. J.; MORIN, M; GUÉNIN, G. Influência da Máquina de Ensaio na Fadiga Termomecânica de Fios Atuadores com Memória de Forma. **Anais do I Congresso**

**Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2000)**, Natal – RN, Brasil, pp. 1 – 10, 2000.

DUERIG, T. W.; STOCKEL, D.; KEELEY, A. **Actuator and Work Production Devices**. In Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. Butterworth-Heinemann, London. p. 181-193, 1990.

FURUYA, Y.; SHIMADA, H. **Shape Memory Actuators for Robotic Applications**. In Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. Butterworth-Heinemann, London. p. 338-354, 1990.

LIMA, I. S. T. **Projeto e Construção de uma Máquina de Fadiga para Fios com Memória de Forma**. Relatório de Atividades PIBIC/CNPq. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, Brasil, 70p, 2004.

NASCIMENTO, M. M. S. F.; ROCHA NETO, J. S.; LIMA, A. M. N; DE ARAÚJO, C. J. Caracterização Eletro-Termomecânica de Fios Atuadores Ti-Ni com Memória de Forma Visando Aplicações na Robótica. **Anais do III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2004)**, Belém – PA, Brasil, pp. 1 – 10, 2004.

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