

CARACTERIZAÇÃO ELETRO-TERMOMECHANICA DE FIOS ATUADORES Ti-Ni COM MEMORIA DE FORMA VISANDO APLICAÇÕES NA ROBÓTICA

Maria Marony S. F. Nascimento

José Sérgio da Rocha Neto

Antonio Marcus Nogueira de Lima

Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Cep : 58109-970, Campina Grande – PB, Brasil.

e-mail: zesergio@dee.ufcg.edu.br

Carlos José de Araújo

Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Caixa Postal: 10069, Cep : 58109-970, Campina Grande – PB, Brasil.

e-mail: carlos@dem.ufcg.edu.br

Resumo. Neste trabalho uma plataforma experimental foi especialmente desenvolvida para realizar a caracterização eletro-termomecânica de fios finos de ligas com memória de forma visando a subsequente modelagem do seu comportamento de histerese na trajetória de deformação (ϵ) versus temperatura (T) sob carga mecânica. Esta plataforma foi utilizada para determinar o comportamento $\epsilon - T$ de um fio atuador TiNi de 150 μ m de diâmetro e 90mm de comprimento. O fio atuador é tracionado uniaxialmente por pesos constantes enquanto um sistema controlado de injeção de potencia elétrica permite realizar o ciclo de aquecimento e resfriamento. Na ausência de uma técnica precisa para medir a temperatura do fio, optou-se por realizar sua estimação a partir da corrente elétrica, utilizando a equação de transferência de calor em regime permanente. As oscilações na deformação do fio devido à variação da temperatura do ambiente foram severamente reduzidas através do isolamento térmico em torno da região do comprimento do fio. O controle da corrente elétrica passando através do fio TiNi e a medida de sua deformação correspondente ao regime permanente usando um sensor de deslocamento tipo LVDT com 5 μ m de resolução, foram realizadas através de instrumentos compatíveis com a interface GPIB. Os resultados obtidos permitem determinar experimentalmente a histerese do comportamento resistência elétrica versus temperatura ($R - T$) assim como aquela referente ao comportamento $\epsilon - T$ do fio TiNi sob diversos níveis de carga externa, possibilitando assim a validação de modelos de histerese para esses materiais funcionais.

Palavras chave: Ligas com memória de forma, efeito memória de forma, fios atuadores, materiais inteligentes.

1. INTRODUÇÃO

Ligas com memória de forma (LMF) são materiais metálicos especiais que possuem a surpreendente capacidade de recuperar uma deformação “aparentemente plástica” introduzida a uma baixa temperatura por intermédio de um aquecimento subsequente acima de uma temperatura dita crítica. Este fenômeno, denominado efeito memória de forma (EMF), é intimamente associado a uma transformação de fase do tipo martensítica, cristalograficamente reversível (Otsuka e 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 sob carga (*stress assisted 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 a LMF é considerada um “atuador elétrico”. Este modo de acionamento elétrico vem sendo frequentemente utilizado em protótipos de robôs para aplicações diversas (Duerig *et al.*, 1990; Furuya e Shimada, 1990). Porém, se o acionamento (aquecimento e resfriamento) é realizado por intermédio da variação controlada da temperatura ambiente (convecção forçada, por exemplo), a LMF é considerada um “atuador térmico”. Neste contexto, este trabalho tem por objetivo realizar a caracterização eletro-termomecânica de um fio atuador LMF Ti-Ni através de sua ativação elétrica controlada visando à modelagem de seu comportamento histerético deslocamento *versus* temperatura, assim como aplicações futuras desses atuadores LMF no domínio da robótica.

2. CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

2.1. Descrição da bancada de testes

A Figura (1) ilustra esquematicamente a bancada de testes especialmente desenvolvida para o estudo da resposta ao aquecimento elétrico de fios finos de ligas com memória de forma (LMF). O aparato experimental consiste basicamente de uma estrutura mecânica para fixação e carregamento do fio atuador LMF, contendo um sensor de deslocamento tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) e um sistema de controle do aquecimento elétrico e aquisição de dados. Na estrutura mecânica da bancada de testes, o quadro em alumínio (1) foi montado a partir de cantoneiras em L (50x50mm) unidas por intermédio de parafusos e serve como suporte para os eixos guia fixo (2) e móvel (7) e também para o LVDT (6). O fio atuador LMF a ser caracterizado (5) é preso pelas garras mecânicas em nylon (3, 4), enquanto a aplicação de carga é realizada depositando pesos constantes sob a plataforma (8), de modo a assegurar um estado de tração uniaxial no fio LMF. A deformação originada pela aplicação de carga e/ou ciclagem térmica do fio pode ser acompanhada por um sensor LVDT modelo AX/5.0/P da Solartron. Segundo o fabricante, sua precisão é de 5µm. Este LVDT vem acompanhado de um módulo de condicionamento BICM (*Boxed Inline Conditioning Module*), o qual é alimentado por uma tensão contínua de +/-15V gerando uma saída também contínua de +/-10V para um curso completo de sua haste de +/-5mm, correspondendo portanto a uma sensibilidade de 0,5mm/V. O sistema de controle e comando consiste de uma fonte DC programável HP E3631A e três multímetros de bancada HP 34401, todos possuindo interface GPIB que possibilita a leitura e escrita de dados. Um conversor tensão/corrente permite originar uma onda de corrente $i(t)$ do tipo dente de serra, a qual é responsável pelo aquecimento e resfriamento controlado do fio atuador LMF. Os multímetros da Fig. (1) fazem a leitura da tensão no fio LMF, da corrente que circula no fio e do sinal de saída do BICM do LVDT. A aquisição dos dados é realizada utilizando um computador IBM PC 486DX4 – S100 equipado com uma placa GPIB. Um programa que inclui rotinas de leitura e escrita de dados foi desenvolvido em linguagem

C. Este programa lê um arquivo de entrada correspondente ao sinal $V_i(t)$ no formato ASCII previamente montado no software Matlab e cada dado deste arquivo enviado à fonte programável é aplicado ao conversor tensão/corrente da Fig. (1).

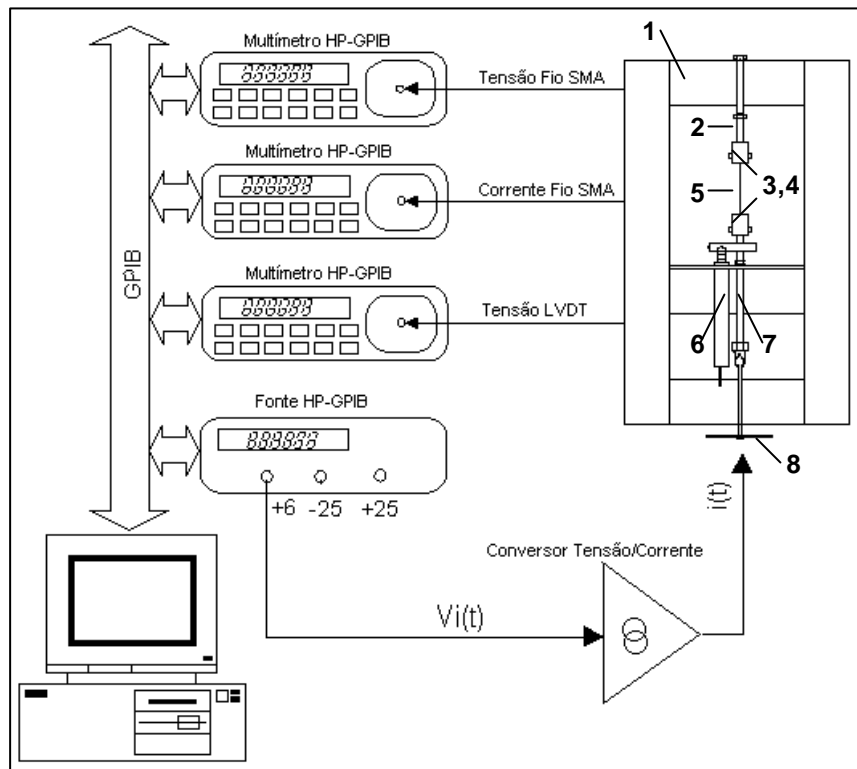


Figura 1 – Esquema simplificado da bancada de testes, incluindo a estrutura mecânica e o sistema eletrônico de comando e aquisição de dados. A estrutura mecânica tem os seguintes componentes:

- (1) Quadro em alumínio; (2) eixo guia fixo; (3),(4) garras mecânicas; (5) fio atuador LMF; (6) sensor LVDT; (7) eixo guia móvel; (8) plataforma de carga.

A Figura (2) mostra uma fotografia da bancada de testes ilustrada na Fig. (1). Na Figura (2a) observa-se uma vista geral do sistema enquanto a Fig. (2b) mostra mais detalhadamente a região próxima ao fio LMF.

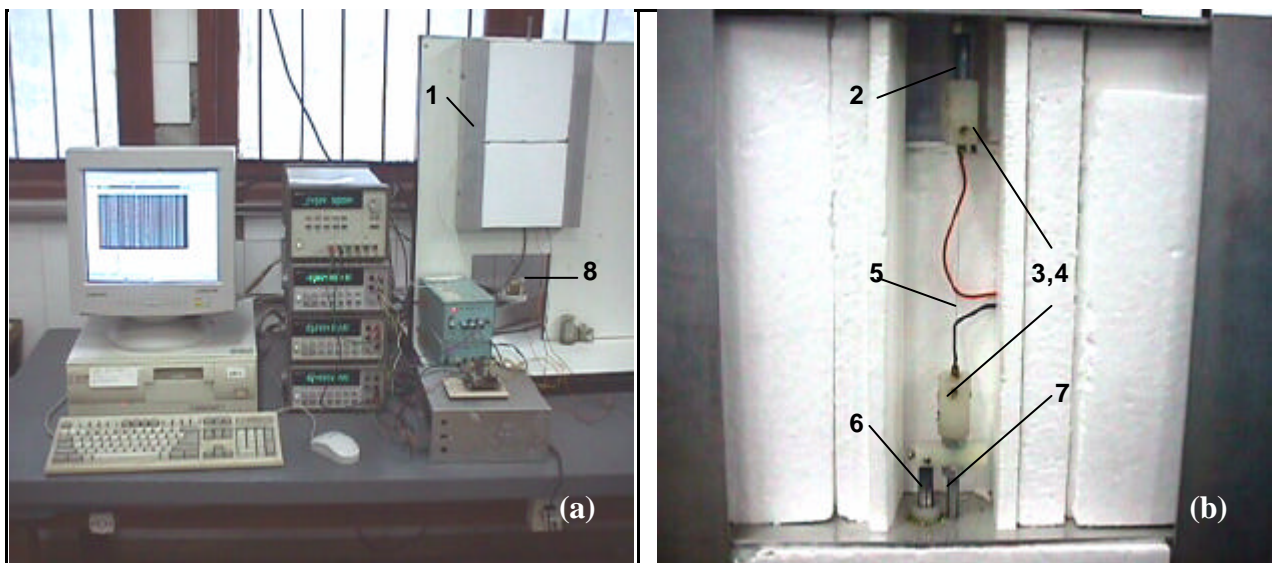


Figura 2 – Plataforma de testes. (a) Vista geral. (b) Vista em zoom da região do fio atuador LMF.

2.2. Fio atuador LMF

O fio LMF fornecido pela empresa norte-americana Mondo-Tronics Inc. (Gilbertson, 2000) tem 150µm de diâmetro e foi fabricado a partir de uma liga Ti-Ni equiatômica. As amostras utilizadas, conforme indica a Fig. (2b), têm comprimento de aproximadamente 90mm. As temperaturas de transformação do material, fornecidas pelo fabricante, são $M_f = 42^\circ\text{C}$, $M_s = 52^\circ\text{C}$, $A_s = 68^\circ\text{C}$ e $A_f = 78^\circ\text{C}$.

2.3. Modelo temperatura – corrente

A bancada de testes mostrada nas Figs. (1) e (2) permite obter o comportamento da deformação (ϵ) e da resistência elétrica (R) do fio LMF em função da corrente elétrica $i(t)$. No entanto, a caracterização destes materiais é feita com base nas temperaturas de transformação e não em termos da corrente elétrica de acionamento. Alguns autores, mesmo usando aquecimento elétrico por efeito Joule, tem relatado a instalação de um termopar na superfície do fio LMF visando à medida direta da temperatura durante a passagem de corrente. Porém, considerando o diâmetro extremamente reduzido do fio LMF utilizado nesse estudo, essa operação de instalação de um termopar diretamente em sua superfície seria bastante delicada. A perspectiva de se utilizar um sensor infravermelho baseado num detector piroelétrico foi também descartada pelos mesmos motivos descritos acima.

Na ausência de uma técnica precisa e reprodutível de medição direta da temperatura do fio LMF, optou-se por estimá-la a partir da equação de equilíbrio térmico que rege a troca de calor entre o fio ativado eletricamente e o ambiente que o circunda. A Equação (1) descreve essa relação:

$$rC_p V \frac{dT}{dt} = Ri(t)^2 - hA[T(t) - T_\infty] \quad (1)$$

onde r e C_p são respectivamente a massa específica e o calor específico do material do fio LMF, V é o volume do fio, A é sua área superficial, R é sua resistência elétrica, h é o coeficiente de transferência de calor entre o fio e o meio que o circunda e T_∞ é a temperatura do meio.

Efetivamente, os parâmetros físicos da Eq. (1) não são constantes durante a variação de temperatura, e principalmente na faixa de transformação do fio LMF, embora isso seja frequentemente assumido. A variação de volume durante a transformação é bastante pequena, da ordem de 0,16%, mas significantes mudanças podem ser observadas nos valores de C_p e R .

Neste estudo, os parâmetros R e ϵ foram medidos após o fio atuador ter atingido o estado de regime permanente correspondente a uma corrente elétrica i , de tal forma que a Eq. (1) se reduz a:

$$T - T_\infty = \frac{R}{hA} i^2 \quad (2)$$

A aplicação da Eq. (2) implica necessariamente na estimação do valor do coeficiente de transferência de calor por convecção h . Esta estimação foi realizada experimentalmente através de dois ensaios. O primeiro foi conduzido no interior de uma estufa, onde o fio LMF foi aquecido da temperatura ambiente até aproximadamente 90°C e em seguida resfriado novamente até a temperatura ambiente. Durante este primeiro experimento foi levantada a curva de resistência elétrica versus temperatura. O segundo ensaio foi realizado na plataforma experimental da Fig. (2) sem que nenhuma carga externa tenha sido aplicada ao fio. Durante este segundo experimento foi levantada a curva resistência elétrica versus corrente de acionamento.

Utilizando então a Eq. (1) e levando-se em consideração que a corrente e a resistência elétrica para o experimento realizado na plataforma experimental foram medidos em regime permanente, podemos aplicar a Eq. (2). Assim, define-se o seguinte problema de estimação de parâmetros:

$$R_n i_n^2 = hA(T_n - T_\infty); n = 1, \dots, N \quad (3)$$

onde N é o número de amostras. Com os valores de R_n , i_n e T_n conhecidos a partir dos dois experimentos descritos anteriormente, tem-se um problema de identificação de parâmetros para h . Utilizando o procedimento de identificação proposto por Ljung (1999), que envolve um conjunto de dados de entradas/saídas, um conjunto de modelos candidatos e uma regra geral pela qual os modelos possam ser avaliados a partir do conjunto de dados, a identificação de h e T_∞ se torna simples e o problema de identificação é resolvido de acordo com a equação:

$$y(x) = \mathbf{a}T(x) - \mathbf{b} \quad (4)$$

onde $\mathbf{a} = hA$, $\mathbf{b} = hAT_\infty$ e $y(x) = R_n i_n^2$.

O método dos mínimos quadrados foi utilizado para a identificação dos parâmetros. O valor obtido para h foi de $88,2 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ e para T_∞ foi de $25,1 ^\circ\text{C}$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Acionamento elétrico do fio LMF

A Figura (3) mostra a forma da onda de corrente aplicada ao fio LMF para todos os experimentos realizados e a Fig. (4) revela a respectiva onda de temperatura estimada a partir da Eq. (2). Na Figura (3) a taxa de aquecimento e resfriamento é constante, correspondente a $4,78 \text{ mA/min}$, resultando na onda de temperatura da Fig. (4), estimada usando a Eq. (2). Para efeito de análise em termos de temperatura absoluta deve-se adicionar o valor de T_∞ aos resultados da Fig. (4).

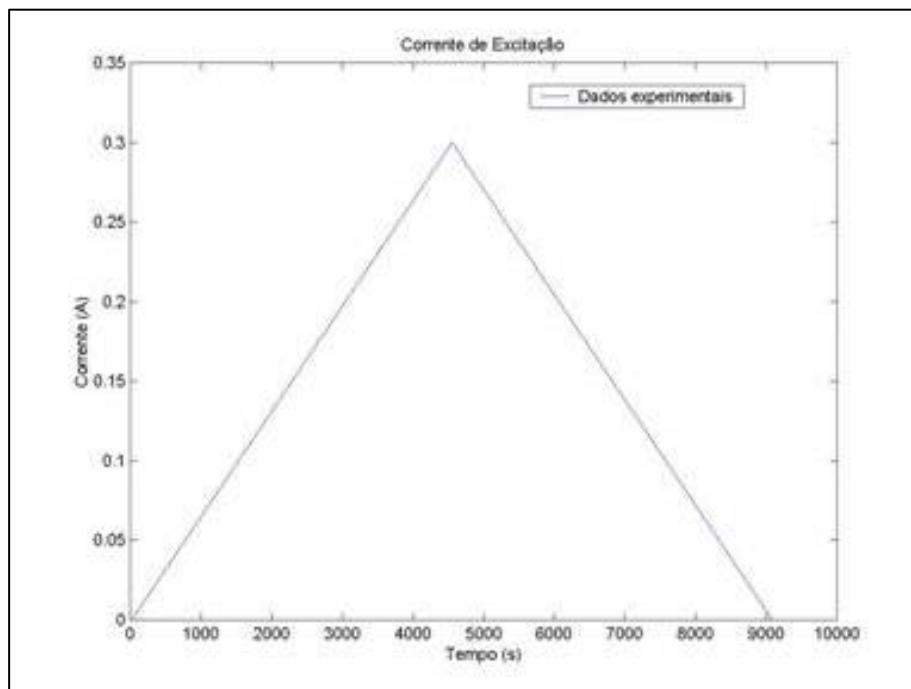


Figura 3 – Forma da onda de corrente usada para aquecer o fio LMF.

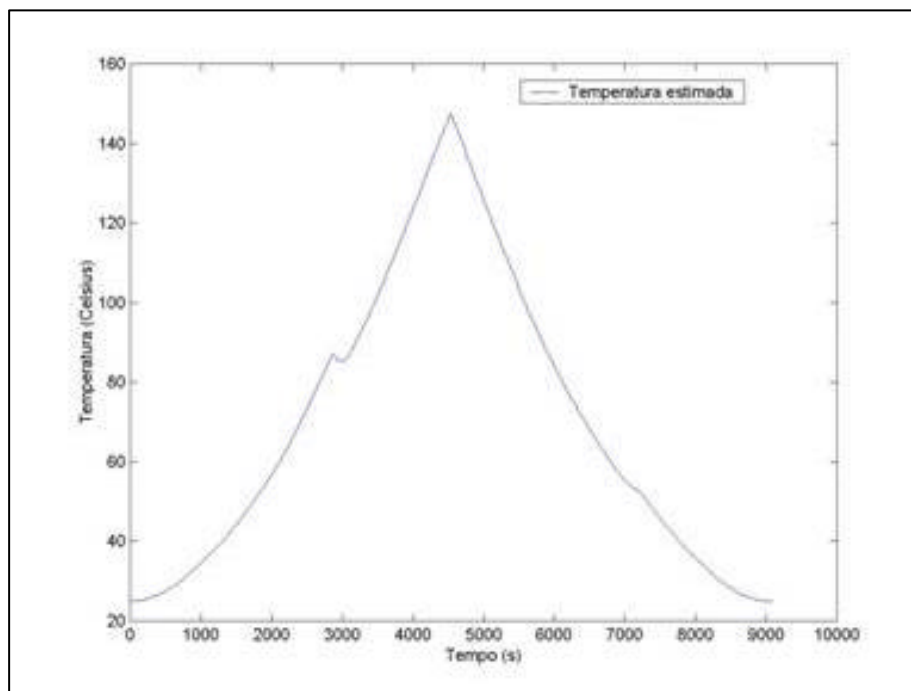


Figura 4 – Onda de temperatura estimada a partir da Eq. (2).

3.2. Caracterização eletro-termomecânica do fio LMF

3.2.1. Caracterização da histerese $\epsilon - T$

A Figura (5) mostra os laços de histerese obtidos para o comportamento deformação *versus* temperatura para cargas aplicadas na faixa de 142MPa (255g) a 225MPa (405g). Para todos os níveis de carregamento mecânico, a contração observada foi praticamente constante, da ordem de 5%, indicando que na faixa de 142 a 225MPa existe uma completa orientação das variantes de martensita no interior do fio LMF. Além disso, verifica-se claramente o deslocamento dos laços de histerese na direção das temperaturas mais altas quando do aumento da carga aplicada. Este comportamento corresponde a um aumento das temperaturas de transformação em função do carregamento mecânico, e é típico das ligas com memória de forma, sendo descrito por uma lei de Clausius-Clayperon modificada para o caso destes materiais (Otsuka e Wayman, 1998). Os laços de histerese $\epsilon - T$ da Fig. (5) foram simulados com sucesso por Nascimento (2003) utilizando um modelo desenvolvido com base na teoria de aproximação ao laço principal (Almeida *et al*, 2002).

As temperaturas de transformação obtidas a partir das curvas da Fig. (5) são mostradas na Fig. (6). A inclinação C_A e C_M das retas que definem os aumentos lineares das temperaturas de transformação austenítica (A_s e A_f) e martensítica (M_s e M_f) foram, respectivamente, de 6,8 e 4,3 $MPa/^{\circ}C$. Estes resultados estão dentro da larga faixa de valores para C_A e C_M apresentados na literatura, situados entre 3 e 20 $MPa/^{\circ}C$ (Otsuka e Wayman, 1998).

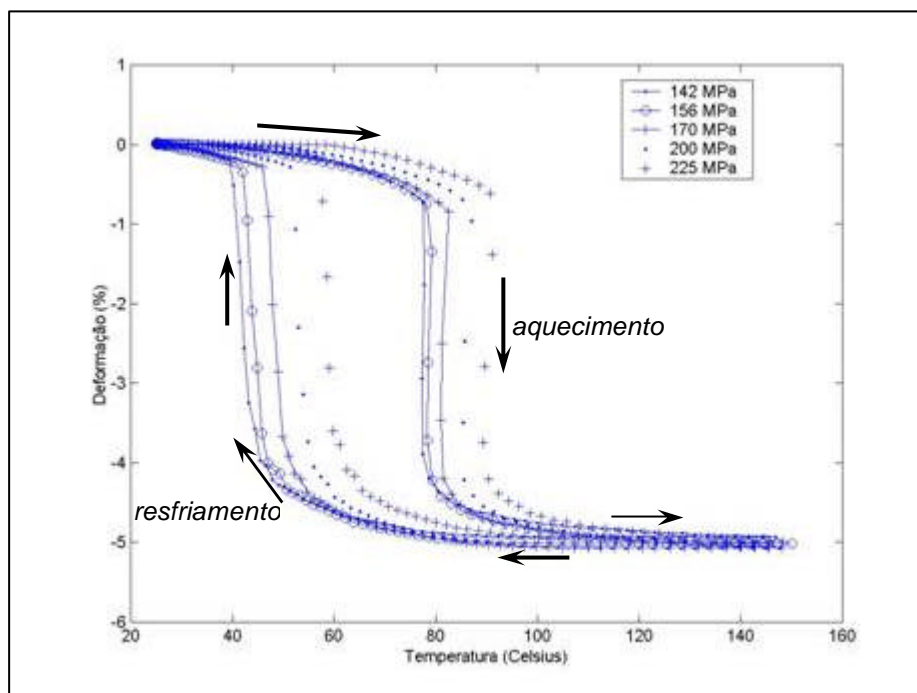


Figura 5 – Laços de histerese $\epsilon - T$ para diversos níveis de carga aplicada ao fio LMF.

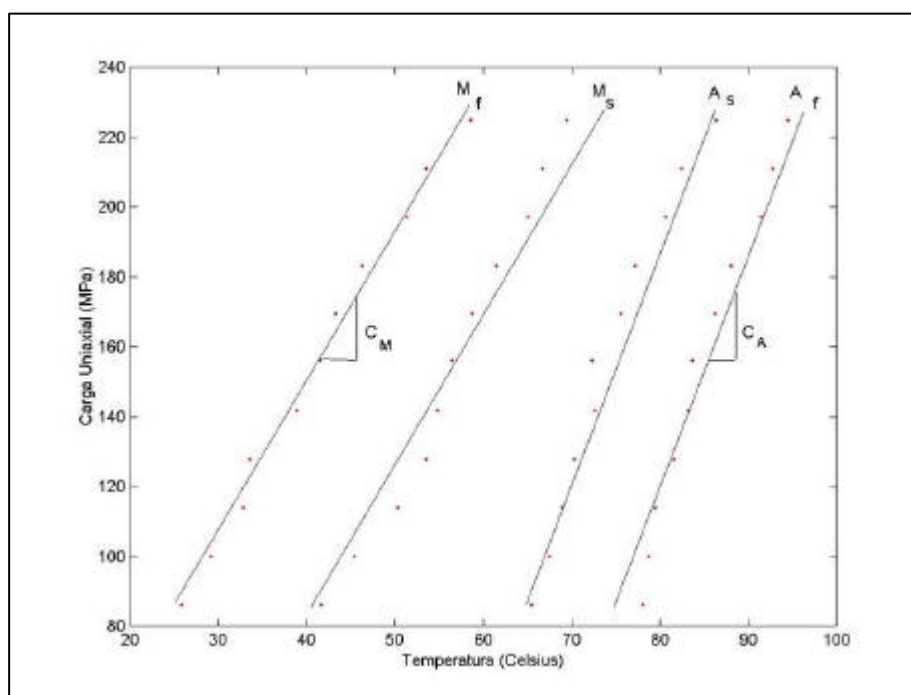


Figura 6 – Temperaturas de transformação em função da carga externa aplicada ao fio LMF.

3.2.2. Caracterização da histerese $R - T$

Para cada valor de corrente da onda da Fig. (3) mediu-se, além da contração do fio LMF mostrada na Fig. (5), o valor absoluto de sua resistência elétrica, permitindo assim caracterizar o comportamento histéretico da resistência *versus* temperatura. Este comportamento é mostrado na Fig. (7), para a mesma faixa de carregamento externo da Fig. (5).

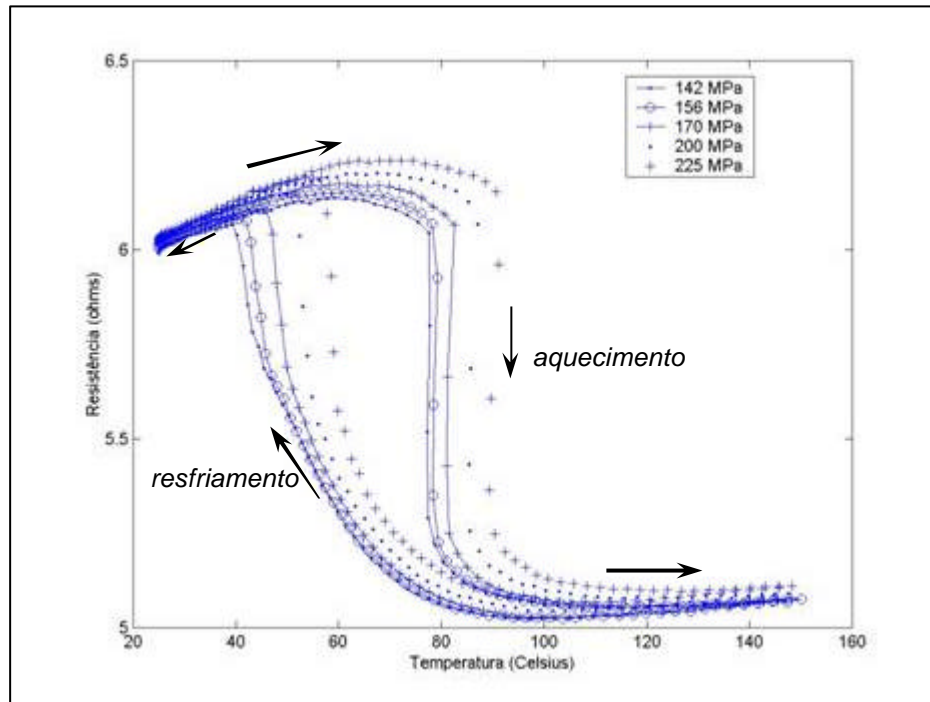


Figura 7 – Laços de histerese $R - T$ para diversos níveis de carga aplicada ao fio LMF.

Da análise da Fig. (7) verifica-se que, para todos os níveis de carga na faixa estudada, a resistência elétrica durante o aquecimento atinge um valor máximo que é de 2 a 3% superior àquele da resistência inicial a 25 °C. Além disso, para todas as cargas estudadas, a resistência elétrica é reduzida de 17 a 18% na região de transformação em relação à resistência máxima.

A combinação dos resultados das Figs. (5) e (7) visando obter o comportamento $e - R$ é mostrado na Fig. (8) para uma carga externa correspondente a 200MPa. Esta figura revela que não é possível obter uma relação linear e sem histerese entre e e R para o fio LMF estudado, ao contrário do que ocorre para fios da LMF Ti-Ni-Cu (De Araújo, 2001). Esta ausência de linearidade sem histerese no comportamento $e - R$ ocorre por que os laços de histerese $e - T$ e $R - T$ não apresentam exatamente a mesma forma geométrica, conforme verifica-se comparando as Figs. (5) e (7). Durante o resfriamento, no comportamento $R - T$ da Fig. (7) observa-se que a transformação ocorre lentamente entre 5 e 5,5 Ω de resistência elétrica, enquanto a transformação no comportamento $e - T$ evolui rapidamente numa faixa estreita de temperatura. Essa anomalia no comportamento $R - T$ pode indicar a presença de uma transformação intermediária austenita – fase R , passível de ocorrer nas LMF do sistema binário Ti-Ni e responsável pela não linearidade no comportamento $e - R$ (De Araújo, 2001). A ausência do comportamento linear não histerético na característica $e - R$ do fio atuador LMF impossibilita o controle de seu deslocamento via monitoramento de sua variação de resistência elétrica, conforme estabelecido por De Araújo *et al* (2001).

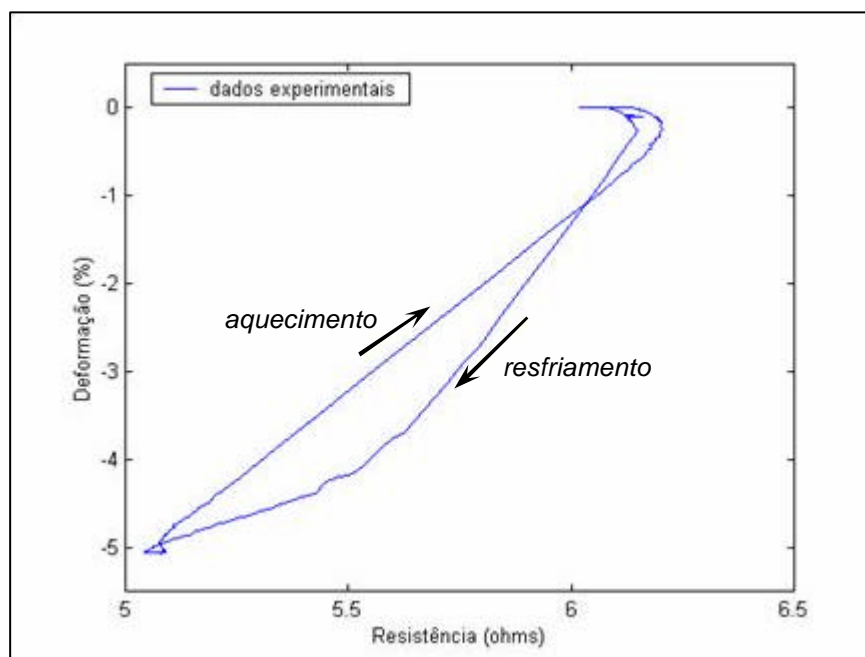


Figura 8 – Comportamento $\epsilon - R$ para o fio LMF submetido a 200MPa.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho a caracterização eletro-termomecânica de um fio atuador de 150 μ m de diâmetro, fabricado a partir de uma liga com memória de forma do sistema Ti-Ni, foi realizada com sucesso utilizando uma plataforma experimental especialmente concebida para tal fim. Esta plataforma permitiu a obtenção simultânea dos laços de histerese deformação *versus* temperatura ($\epsilon - T$) e resistência elétrica *versus* temperatura ($R - T$), intrínsecos a estes materiais. Para uma faixa de carregamento uniaxial situada entre 142 e 225MPa, a contração do fio atuador foi praticamente constante e da ordem de 5% do seu comprimento inicial. Constatou-se também o aumento linear das temperaturas de transformação austenítica e martensítica nessa faixa de carregamento, com coeficientes de linearidades respectivamente de 6,8 e 4,3 MPa/ $^{\circ}$ C. O acoplamento dos laços $\epsilon - T$ e $R - T$ levou a obtenção da característica $\epsilon - R$ do fio atuador. No entanto, ao contrário do que se poderia eventualmente esperar, o comportamento $\epsilon - R$ não levou a constatação de uma linearidade sem histerese, dificultando o controle do deslocamento desses atuadores por intermédio do monitoramento de sua variação de resistência elétrica.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq/PRONEX e ao Fundo Setorial de Energia (CT-Energ/CNPq) pelo apoio financeiro, além da CAPES pela concessão da bolsa de mestrado a Maria Marony S. F. Nascimento.

6. REFERÊNCIAS

- Almeida, L. A. L., Deep, G. S., Lima, A. M. N., Neff, H., 2002. “The Limiting Loop Proximity (L^2P) Hysteresis Model”, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 39(1), pp. 523-528.
- Almeida, L. A. L., Deep, G. S., Lima, A. M. N., Neff, H., 2002. “Modeling of the Hysteretic Metal-Insulator Transition in Vanadium Dioxide Infrared Detector”, Optical Engineering, Vol. 41(10), pp. 2582-2588.
- De Araújo, C. J., Lopez-Cuellar, E., Morin, M., Guénin, G., 2001. “Sobre a Possibilidade de Controlar Atuadores à Memória de Forma Via Medidas de Variação de Resistência Elétrica:

- Uma Análise Experimental”, Anais do V Congresso Iberoamericano de Ingenieria Mecânica (CIDIM), Mérida, Venezuela, pp. 345 – 350.
- Duerig, T. W., Stockel, D., Keeley, A, 1990, Actuator and work production devices. In Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. Edited by T. W. Duerig. Butterworth-Heinemann, London, pp. 181-193.
- Furuya, Y., Shimada, H., 1990, Shape memory actuators for robotic applications. In Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. Edited by T. W. Duerig. Butterworth-Heinemann, London, pp. 338-354.
- Gilbertson, R. B., 2000. “Muscle Wires Project Book”, Mondo-Tronics Inc., 55p.
- Ljung, L., 1999. “System Identification: Theory for the User”, Prentice Hall, Linkoping University, Sweden.
- Nascimento, M. M. S. F., 2003. “Contribuição ao Estudo da Histerese em Ligas com Memória de Forma”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande – PB, 79p.
- Otsuka, K., Wayman, C.M., 1998. “Shape Memory Materials”, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 284p.

ELECTRO-THERMOMECHANICAL CHARACTERIZATION OF Ti-Ni SHAPE MEMORY WIRE ACTUATORS AIMING ROBOTIC APLICATIONS

Maria Marony S. F. Nascimento

José Sérgio da Rocha Neto

Antonio Marcus Nogueira de Lima

Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Cep : 58109-970, Campina Grande – PB, Brasil.

e-mail: zesergio@dee.ufcg.edu.br

Carlos José de Araújo

Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Caixa Postal: 10069, Cep : 58109-970, Campina Grande – PB, Brasil.

e-mail: carlos@dem.ufcg.edu.br

Abstract. *In this work, an experimental test bench was specially designed to perform the electro-thermomechanical characterization of shape memory alloy (SMA) wires. This apparatus was used to determine the strain – temperature (ϵ - T) and electrical resistance – temperature (R - T) hysteretic characteristics of a Ti-Ni shape memory wire (90mm in length and 150 μ m in diameter) under mechanical load. The actuator wire is loaded by means of constant weights and a controlled system for injection of electrical power allows realizing the heating – cooling cycles. In the absence of an accurated and reliable technique for measurement of the SMA wire temperature, such temperature is estimated from the electrical current using the static thermal equilibrium equation for the steady-state. External room temperature disturbances are greatly reduced by embedding the wire in a heat-insulating medium. The control of the heating electrical current through the wire and measurement of the steady-state wire deformation with an LVDT displacement sensor having a resolution of 5 μ m, was done using GPIB compatible instruments. The obtained results reveal the hysteretic behavior in the ϵ - T and R - T characteristics for some levels of applied loads.*

Keywords: *Shape memory alloys, shape memory effect, actuator wires, intelligent materials.*