

MONITORAMENTO SIMULTÂNEO DA DEFORMAÇÃO E DA VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA VISANDO O CONTRÔLE DE ATUADORES A MEMÓRIA DE FORMA

Carlos José de Araújo

Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Mecânica

Caixa Postal: 10069

Campina Grande – PB BRASIL

e-mail: carlos@dem.ufpb.br

Michel Morin

Gérard Guénin

INSA de Lyon, Laboratoire GEMPPM, Bat. 502, 1^{er} étage

20, Av. Albert Einstein – 69621 Villeurbanne FRANÇA

Resumo:

O efeito memória de forma (EMF) que algumas ligas metálicas apresentam permitem que esses materiais sejam considerados intrinsecamente como atuadores que podem produzir um trabalho mecânico externo. A curva característica destes atuadores, deformação (ϵ) versus temperatura (T), apresenta uma histerese térmica (H_T) que dificulta o controle do deslocamento destes elementos. Este trabalho tem por objetivo verificar a possibilidade de controlar tais atuadores através de medidas simultâneas da deformação e da variação de resistência elétrica ($\Delta R/R$) em função da temperatura. Os resultados obtidos mostram que obtém-se uma relação linear entre ϵ e $\Delta R/R$ quando se elimina a temperatura. No entanto, a curva $\epsilon \times \Delta R/R$ obtida também apresenta uma histerese que é função da carga externa. Demonstra-se experimentalmente que essa histerese pode ser completamente eliminada após alguns ciclos de aquecimento e resfriamento do atuador, viabilizando a idéia do controle de seu deslocamento através do monitoramento de sua resistência elétrica.

Palavras chave: Fios, efeito memória de forma, atuadores, controle, deformação, resistência elétrica.

1. INTRODUÇÃO

As ligas com efeito memória de forma (EMF) representam uma nova classe de materiais capazes de produzir um deslocamento considerável sob carga quando submetidas a uma variação de temperatura. Este fenômeno pode ser reproduzido de maneira cíclica e portanto tais materiais podem ser usados como atuadores termomecânicos para aplicações

na robótica (Furuya & Shimada, 1990; Melton, 1998). A recuperação da deformação associada a um dado carregamento mecânico está diretamente relacionada a uma transformação de fase do tipo martensítica reversível ocorrendo no interior do material durante aquecimento e resfriamento (Funakubo, 1987). Infelizmente, a curva deslocamento versus temperatura característica desses atuadores não é linear e apresenta uma histerese térmica que dificulta o seu controle. Esta variação macroscópica da forma em função da temperatura é acompanhada da variação simultânea de uma série de propriedades físicas associadas a transformação de fase no material (Harrison, 1990), dentre elas a resistividade elétrica. Por essa razão, alguns pesquisadores (Honma *et al.*, 1984; Pruski & Kihl, 1993) sugerem que nas aplicações destes materiais como atuadores termomecânicos, um sistema de controle realimentado (*feedback control system*) pode ser desenvolvido através do acompanhamento da variação de resistividade elétrica observada durante a transformação (deslocamento) do material com a temperatura. Mesmo que essa proposta seja extremamente interessante, poucos testes foram efetivamente realizados e a possibilidade de controle do atuador com EMF depende bastante do material e dos tratamentos termomecânicos aplicados (Hesselbach *et al.*, 1994; Reynaerts *et al.*, 1995 e Mertmann & Hornbogen, 1997).

Em termos gerais, este trabalho se propõe principalmente a obter resultados experimentais do acoplamento entre a deformação associada ao EMF sob carga e a variação de resistência elétrica de fios com memória de forma submetidos a ciclagem térmica com o objetivo de verificar as potencialidades deste procedimento para o controle efetivo de elementos a memória de forma.

2. CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

A figura 1 mostra um esquema do sistema atuador com EMF e o resultado teoricamente esperado de um acoplamento entre as medidas de deslocamento, expresso pela deformação (ϵ), e variação de resistência elétrica do atuador ($\Delta R/R$).

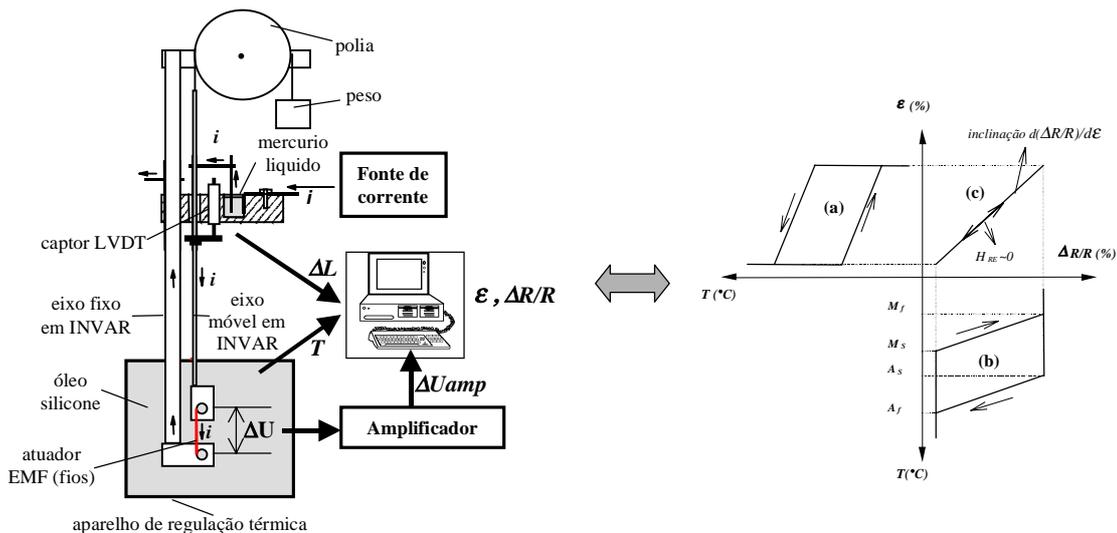


Figura 1 – Representação esquemática do sistema atuador com EMF para monitoramento simultâneo do deslocamento (ϵ) e da variação de resistência elétrica ($\Delta R/R$).

Observa-se que o sistema montado consiste basicamente de um fio atuador com EMF carregado em tração uniaxial constante por intermédio de pesos e podendo ser continuamente aquecido e resfriado através de um banho de óleo silicone termicamente regulado, enquanto que uma fonte de corrente contínua faz passar uma corrente elétrica constante (i) diretamente no fio atuador. O deslocamento vertical do fio (ΔL) é medido por um captor LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) enquanto que o sinal de tensão elétrica (ΔU) originado pela passagem da corrente é medido e amplificado (ΔU_{amp}). Uma placa de aquisição de 12bits, instalada em um computador, armazena os dados de temperatura (T), ΔL e ΔU_{amp} e um programa calcula os valores de ϵ e $\Delta R/R$. Verifica-se na ilustração da figura 1 a presença de uma histerese em temperatura na curva característica ϵ - T (curva a) assim como na curva $\Delta R/R$ - T (curva b), a qual pode ser supostamente contornada quando se elimina a temperatura e obtém-se o comportamento ϵ - $\Delta R/R$ (curva c), linear, de inclinação $d(\Delta R/R)/d\epsilon$ e com uma histerese (H_{RE}) aproximadamente nula.

Os fios atuadores usados no equipamento da figura 1 tiveram comprimentos entre 27 e 32mm. São fios de uma liga Ti-Ni-Cu com EMF fornecidos pela empresa belga *Advanced Materials Technologies Inc.* Todas as amostras apresentam a composição nominal Ti-45.0Ni-5.0Cu (at%), diâmetros de 0.55 mm e foram obtidas por trefilação à frio com redução total de área de 40% durante a fabricação. Os fios foram recozidos à 425°C durante 1h e posteriormente resfriados ao ar ambiente.

Os valores do carregamento mecânico aplicado aos atuadores corresponderam a tensões situadas entre 75MPa e 400MPa. A ciclagem térmica foi realizada entre 10°C e 154°C, independentemente da carga aplicada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Um comportamento experimental típico, obtido com o sistema da figura 1 durante o primeiro ciclo térmico, é mostrado na figura 2 para uma carga equivalente a 175MPa. A figura 2(a) mostra a curva correspondente a deformação sob carga do atuador a memória de forma. Verifica-se que a contração durante o aquecimento permite uma recuperação por EMF da ordem de 6% e o atuador não retorna completamente a posição original a alta temperatura devido a existência de uma deformação acumulada de aproximadamente 1% após o aquecimento. Estes valores de deformação dependem da carga aplicada (De Araújo, 1999). A curva característica da evolução da resistência elétrica com a temperatura é mostrada na figura 2(b). As temperaturas de transformação do atuador, assim como sua histerese térmica (H_T), são determinadas pela aplicação do método das tangentes as curvas das figuras 2(a) e 2(b). Estas figuras revelam que os valores de histerese são praticamente idênticos nas curvas ϵ - T e $(\Delta R/R)$ - T , mas isso não é suficiente para eliminar a presença de uma histerese (H_{RE}) entre ϵ e $(\Delta R/R)$ quando estas medidas são acopladas, como mostra a figura 2(c). No entanto, a relação entre estas duas propriedades é linear e de inclinação $d(\Delta R/R)/d\epsilon$ praticamente igual no aquecimento e no resfriamento. Na realidade a presença de H_{RE} depende da forma das curvas das figuras 2(a) e 2(b), mas Pruski & Kihl (1993) sugerem um método para eliminá-la eletronicamente durante o emprego desses atuadores. A dependência de H_{RE} e da inclinação $d(\Delta R/R)/d\epsilon$ com relação a carga aplicada é mostrada na figura 3.

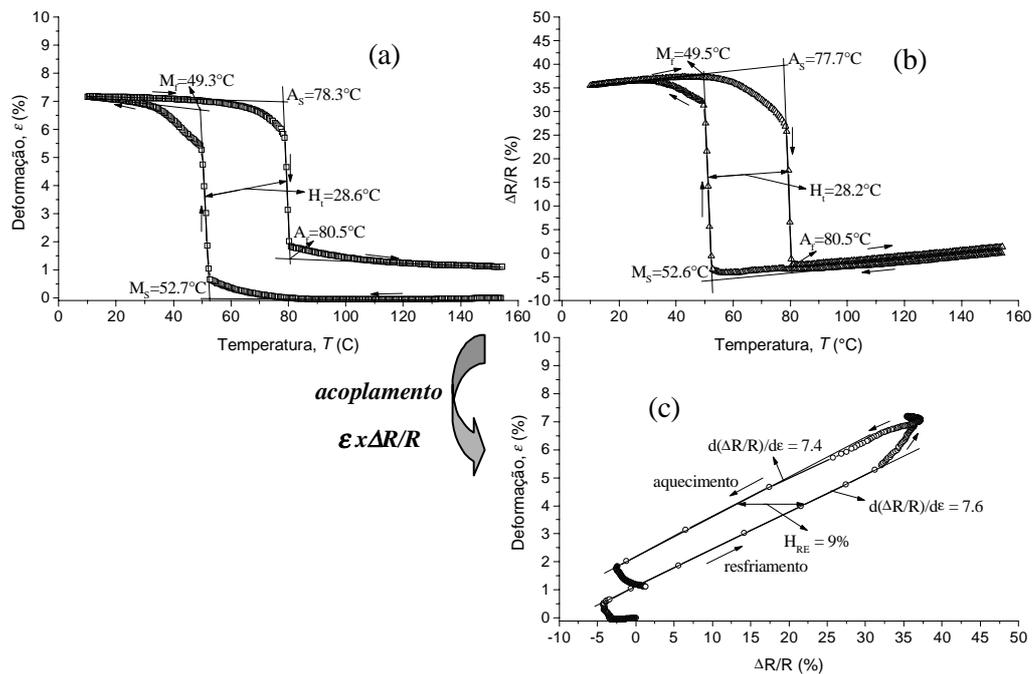


Figura 2 – Acoplamento entre as medidas de deformação e resistência elétrica durante um ciclo térmico simples para uma carga aplicada equivalente a 175MPa. (a) curva ϵ -T. (b) curva $(\Delta R/R)$ -T. (c) curva ϵ - $(\Delta R/R)$.

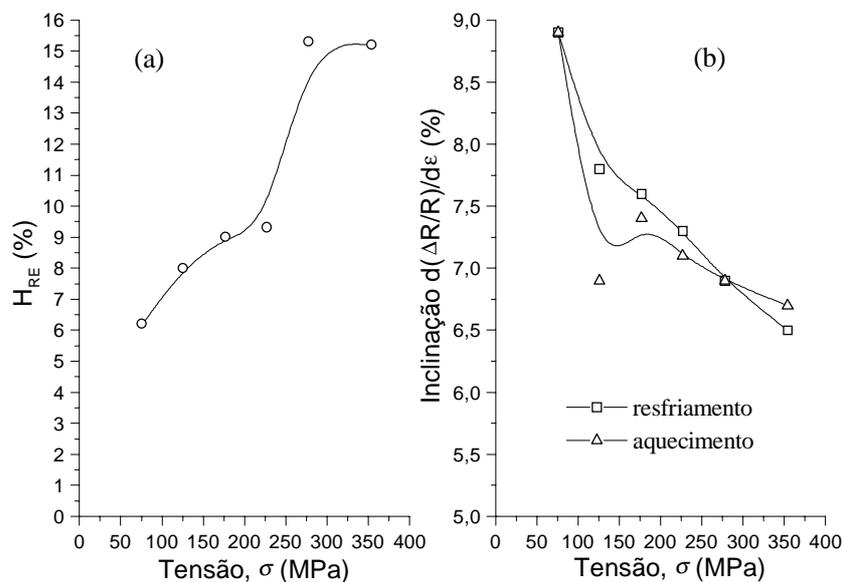


Figura 3 – Variação dos parâmetros do acoplamento ϵ - $(\Delta R/R)$ com a carga aplicada. (a) histerese H_{RE} . (b) inclinação $d(\Delta R/R)/d\epsilon$.

Verifica-se um aumento de H_{RE} e uma diminuição da inclinação $d(\Delta R/R)/d\varepsilon$ com a carga aplicada. Este aumento de H_{RE} torna-se mais pronunciado a partir de 250MPa, onde observa-se uma anomalia na curva ε -T que não existe sobre a curva $(\Delta R/R)$ -T (De Araújo, 1999). Este comportamento de H_{RE} é prejudicial ao controle do deslocamento do fio atuador, mas em teoria poderia ser artificialmente contornado pelo método sugerido por Pruski & Kihl (1993).

Tendo em vista que uma eventual aplicação destes atuadores na robótica implica na realização de operações sucessivas de aquecimento e resfriamento sob carga, os fios com EMF montados no sistema da figura 1 foram também submetidos a ciclagem térmica. Os resultados obtidos durante uma quinzena de ciclos para uma carga equivalente a 175MPa são importantes, como revela a figura 4.

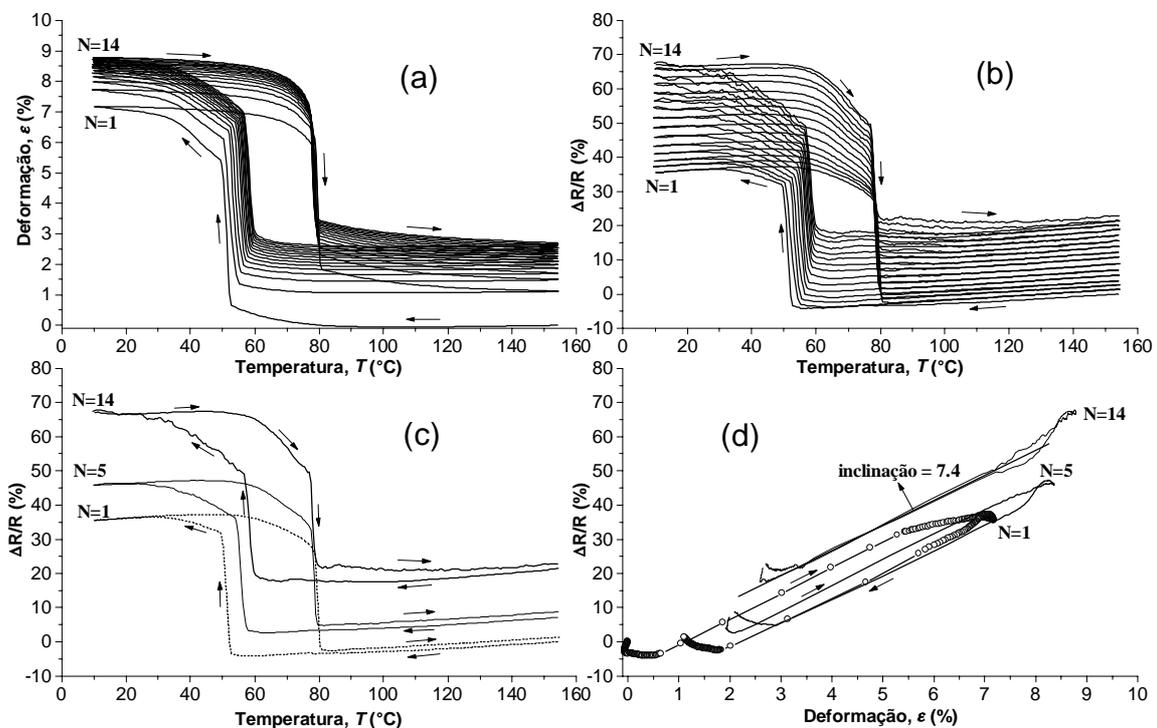


Figura 4 – Evolução do comportamento ε -T- $\Delta R/R$ para 175MPa durante aproximadamente 15 ciclos térmicos. (a) curvas ε -T. (b) curvas $(\Delta R/R)$ -T. (c) algumas curvas $(\Delta R/R)$ -T selecionadas em (b). (d) algumas curvas do acoplamento ε - $(\Delta R/R)$.

Observa-se nas curvas ε -T da figura 4(a) uma diminuição da histerese em temperatura H_T combinada com um deslocamento vertical destas curvas que corresponde a um aumento permanente de comprimento do fio atuador. Este fenômeno tende a saturar-se após os primeiros ciclos térmicos. O comportamento das curvas $(\Delta R/R)$ -T é idêntico em termos de H_T , porém não existe uma tendência clara de saturação da evolução de $\Delta R/R$, como mostra a figura 4(b). Estas evoluções são resultantes da introdução de defeitos microestruturais no interior do material, os quais afetam a transformação martensítica

responsável pelo EMF. A figura 4(c) revela claramente uma mudança na forma das curvas $(\Delta R/R)$ -T durante a ciclagem, fazendo com que a histerese H_{RE} existente no acoplamento ε - $(\Delta R/R)$ seja continuamente reduzida e finalmente anulada após alguns ciclos, como mostra a figura 4(d). Além disso, comparando as figuras 2(c) e 4(d) constata-se que a inclinação $d(\Delta R/R)/dT$ praticamente não é afetada pela ciclagem. Este comportamento traduzido pela figura 4 existe para todos os níveis de tensão estudados (entre 75MPa e 400MPa). No que diz respeito ao controle do fio atuador com EMF, a ausência de histerese entre as duas propriedades monitoradas, assim como a relação linear entre elas, são aspectos fundamentais que revelam a importância do procedimento de ciclagem sob carga, alternativamente a metodologia proposta por Pruski & Kihl (1993). Talvez o único inconveniente seja o deslocamento da curva ε - $(\Delta R/R)$ evidenciado pela figura 4(d), mas esse fenômeno tende a saturar-se para um número de ciclos ligeiramente superior ao realizado nesse trabalho.

Vale ressaltar que o comportamento dos atuadores à memória de forma depende bastante da sua história termomecânica e não existem garantias de que fios semelhantes com EMF (mesma composição química, por exemplo), submetidos a tratamentos termomecânicos diferentes daquele mencionado no item 2, apresentem o mesmo comportamento mostrado na figura 4. Assim sendo, torna-se importante dirigir estudos semelhantes a estes para outros tipos de ligas com EMF e diversos tratamentos termomecânicos, visando determinar as condições ótimas para o comportamento ε - $(\Delta R/R)$.

4. CONCLUSÕES

A realização de medidas simultâneas de deformação e variação de resistência elétrica em função da temperatura, em fios de uma liga com EMF trabalhando sob carga, permitiu demonstrar experimentalmente a viabilidade da idéia de controlar o deslocamento destes atuadores através do monitoramento de sua resistência elétrica. Para o primeiro ciclo térmico, a curva ε - $(\Delta R/R)$ obtida apresenta uma relação linear entre as duas propriedades tanto no resfriamento quanto durante o aquecimento, porém existe ainda uma histerese entre as duas medidas. Para todos os níveis de carga aplicada ao fio atuador, o comportamento ideal para o controle, isto é, relação linear e ausência de histerese entre as duas grandezas durante resfriamento e aquecimento, é obtido após a realização de alguns ciclos térmicos sucessivos, eliminando a necessidade de contornar artificialmente o problema da histerese na curva característica ε - $(\Delta R/R)$. Esta relação unívoca entre estas duas propriedades permitiria determinar a posição do fio atuador a memória de forma simplesmente através da medida de sua resistência elétrica, independentemente do fato do mesmo está sendo aquecido ou resfriado no instante considerado.

Agradecimentos

C. J. De Araújo agradece o apoio da Capes durante seu doutoramento no INSA de Lyon – França (Proc. n° 0073/95-13).

REFERÊNCIAS

- De Araújo, C. J., 1999, Comportement cyclique de fils en alliage à mémoire de forme Ti-Ni-Cu: analyse electro-thermomécanique, dégradation et fatigue par cyclage thermique sous contrainte, Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France, 177p.
- Funakubo, H., 1987, Shape Memory Alloys, Gordon & Breach Publishers, 270p.
- 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.
- Harrison, J. D., 1990, Measurable changes concomitant with the shape memory effect transformation. In Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. Edited by T. W. Duerig. Butterworth-Heinemann, London, pp. 106-111.
- Hesselbach, J., Pittschellis, R., Stork, H., Hornbogen, E. and Mertmann, M., 1994, Optimization and control of electrically heated shape memory actuators. In Proceedings of 4th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, pp. 337-340.
- Honma, D., Miwa, Y. and Iguchi, N., 1984, Application of shape memory effect to digital control actuator, Bulletin of JSME, Vol.27, n°.30, pp. 1737-1742.
- Melton, K. N., 1998, General applications of SMA's and smart materials. In Shape Memory Materials, Edited by K. Otsuka and C. M. Wayman, Cambridge University Press, pp. 220-239.
- Mertmann, M. & Hornbogen, E., 1997, Grippers for the micro assembly containing shape memory actuators and sensors, Journal de physique IV, colloque C5, supplément au Journal de Physique III, Vol 7, n°11, pp. C5-621 - C5-626.
- Pruski, A. & Kihl, H., 1993, Shape memory alloy hysteresis, Sensors and Actuators A, Vol.36, pp. 29-35.
- Reynaerts, D., Peirs, J. and Van Brussel, H., 1995, Production of shape memory alloys for microactuation, Journal of Micromech. and Microeng., Vol.5, pp. 150-152.