



COMPARAÇÃO ENTRE AS RESPOSTAS ELÉTRICA E TÉRMICA DE FIOS ATUADORES COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA

Carlos José de Araújo

Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Aprígio Veloso, 882 - Bodocongó Cep: 58109-970
Campina Grande – PB BRASIL
e-mail: carlos@dem.ufpb.br

Michel Morin

INSA de Lyon, Laboratoire GEMPPM, Bat. 502, 1^{er} étage
20, Av. Albert Einstein – 69621 Villeurbanne FRANÇA
e-mail: morin@gpmmail.insa-lyon.fr

Resumo. *Fios fabricados à partir de ligas com efeito memória de forma demonstram atualmente um forte potencial para aplicações em sistemas ditos inteligentes e/ou adaptáveis assim como no domínio da robótica. Nestes casos, o deslocamento por efeito memória de forma (EMF) pode ser obtido por atuação elétrica (efeito Joule) ou térmica (convecção forçada, por exemplo). Este trabalho é particularmente dedicado a uma análise comparativa entre as performances destes dois modos de atuação aplicados alternativamente a um mesmo fio atuador para diferentes valores de carregamento de tração. Um atuador termoelétrico simples, composto essencialmente de fios de uma liga Ti-Ni-Cu trabalhando sob carregamento de tração uniaxial constante, foi especialmente construído. Os resultados obtidos mostram que, para todos os níveis de carregamento externo, o deslocamento por EMF é maior quando o aquecimento dos fios é realizado via convecção forçada em meio líquido em comparação com o deslocamento medido durante o aquecimento elétrico. De fato, o EMF sob carga obtido por efeito Joule situa-se entre 70 e 90% daquele medido via convecção forçada para carregamentos externos situados entre 75 e 400MPa. Estes resultados são discutidos com relação as diferenças inerentes aos dois modos de transferência de calor aplicados aos fios e aos aspectos físicos relacionados à transformação martensítica responsável pelo fenômeno EMF.*

Palavras chave: *Fios, efeito memória de forma, atuadores.*

1. INTRODUÇÃO

Ligas com efeito memória de forma (EMF) são materiais metálicos especiais que possuem a surpreendente capacidade de recuperar uma deformação “aparentemente

plástica” por intermédio de um aquecimento subsequente acima de uma temperatura dita crítica. Este fenômeno, denominado efeito memória de forma, é intimamente associado a uma transformação de fase do tipo martensítica, cristalograficamente reversível (Funakubo, 1987). 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”. Até o presente momento não existem dados experimentais comparativos da performance em EMF sob carga desses dois modos de atuação quando estes são aplicados alternativamente sobre um mesmo atuador. Assim sendo, este trabalho é particularmente voltado para uma análise teórico-experimental das respostas elétrica e térmica de fios atuadores de uma liga Ti-Ni-Cu com EMF.

2. CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

2.1. O atuador termoeletrico com EMF

Um esquema simplificado do atuador termoeletrico especialmente concebido para esse estudo é mostrado na figura 1. As amostras do fio atuador Ti-Ni-Cu têm comprimentos situados entre 25 e 35mm e são carregadas em tração uniaxial por intermédio de pesos. A ciclagem térmica via convecção forçada é realizada através de um equipamento de regulação térmica HAAKE-C trabalhando com um óleo silicone para alta temperatura Rhodorsil 47V50 (Rhône Poulenc Inc.). Este sistema permite o aquecimento e resfriamento entre -10 e 155°C, a circulação do óleo e a medida da sua temperatura. O acionamento elétrico é realizado por uma fonte de corrente (máx. 12A) de baixa tensão. Neste caso, a temperatura do óleo é mantida constante a $\pm 0.5^\circ\text{C}$ de um valor pré definido. O deslocamento do fio atuador é monitorado continuamente por um extensômetro LVDT (Linear Variable Differential Transducer) devidamente isolado com relação a corrente elétrica de aquecimento (i). Todo o sistema é controlado por computador, equipado com uma interface AD/DA Eurosmart PC-MES2 para aquisição de dados.

O deslocamento do fio atuador é medido em termos da sua deformação (ε) através da equação:

$$\varepsilon = \left(\frac{l - l_0}{l_0} \right) \times 100(\%) \quad (1)$$

onde l é o comprimento instantâneo do fio e l_0 é o comprimento inicial medido na temperatura ambiente.

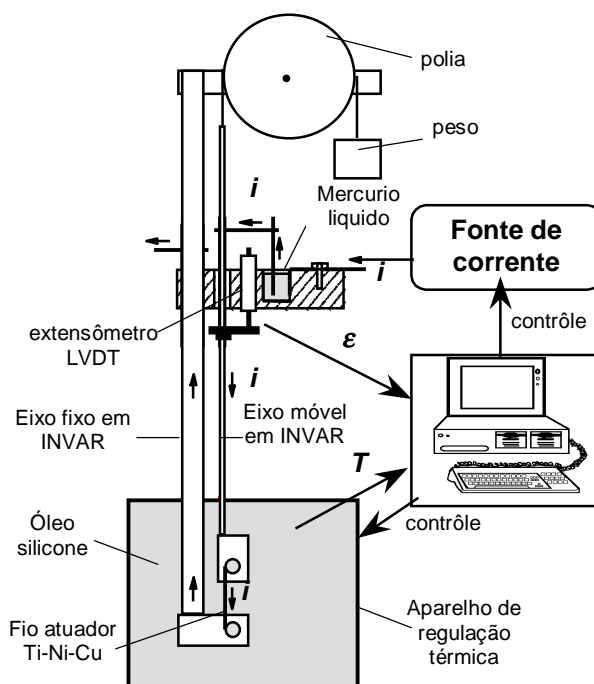


Figura 1 – Esquema simplificado do atuador termoeletrico com EMF.

Durante atuação térmica uma curva deformação (ϵ) versus temperatura (T) é sempre obtida. Por outro lado, quando da utilização do acionamento por corrente elétrica a temperatura do óleo é mantida constante e o deslocamento via EMF é obtido pela aplicação de pulsos de corrente de curta duração (corrente on/off). Neste caso a temperatura do fio atuador não é obtida diretamente e apenas as posições a alta ($i > 0$) e baixa temperatura ($i = 0$) são medidas. Portanto, para utilização alternada do material como atuador elétrico e térmico, o estabelecimento de uma lei de atuação se mostra necessário. Considerando que um ciclo de acionamento elétrico pode ser realizado muito mais rapidamente que um ciclo térmico via convecção forçada, torna-se importante incluir nesta lei de atuação um grande número de ciclos elétricos (De Araújo, 1999). Assim sendo, as seguintes condições de utilização foram estabelecidas:

- para $N = 2^n \Rightarrow$ atuação térmica (convecção forçada, $i = 0$ e T variável)
- para $N \neq 2^n \Rightarrow$ atuação elétrica (pulsos de corrente, $i > 0$ e T constante)

onde N é o número de ciclos e n é um número inteiro.

No caso da atuação elétrica o resfriamento do fio atuador após cessar a corrente é realizado pela circulação do óleo silicone mantido à baixa temperatura ($T = 10^\circ\text{C}$).

2.2. Material

Foram utilizados 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 entre 0.5 e 0.55mm e foram obtidas por

trefilção à frio com redução total de área entre 35 e 40% durante a fabricação. Os fios foram recozidos à 425°C durante 1h seguido de resfriamento ao ar ambiente. As temperaturas de transformação de fase dos fios após tratamento térmico, na ausência de carregamento mecânico externo, foram medidas por variação de resistência elétrica utilizando o método dos quatro pontos. A figura 2 mostra a curva típica obtida assim como os valores das temperaturas características da transformação do material, isto é, $M_f=31^\circ\text{C}$, $M_s=39.5^\circ\text{C}$, $A_s=46^\circ\text{C}$ e $A_f=59^\circ\text{C}$. Observa-se também a presença de uma histerese em temperatura (H_t) da ordem de 18°C.

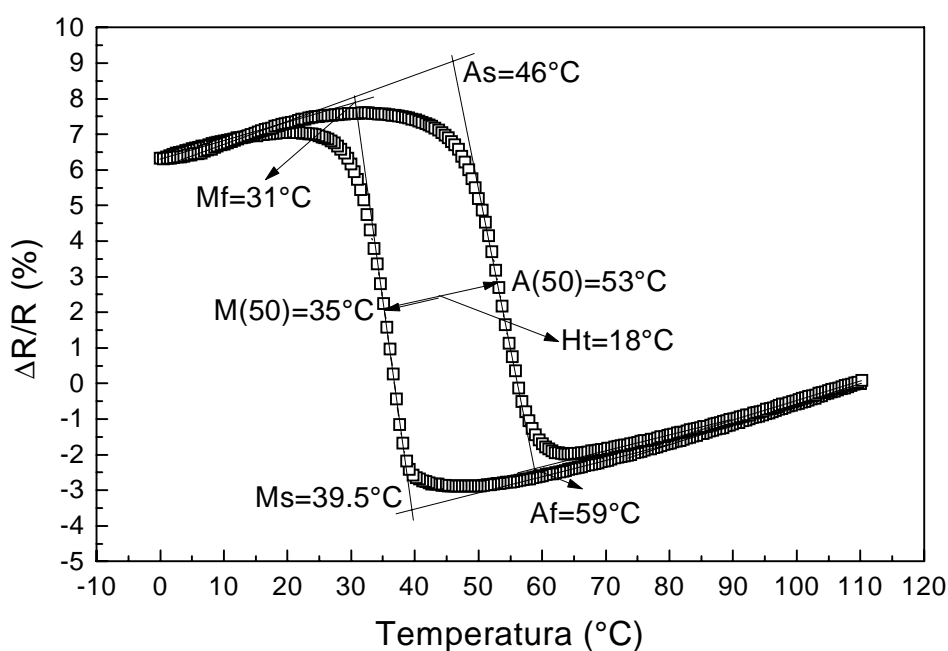


Figura 2 – Temperaturas de transformação de fase do fio atuador Ti-Ni-Cu na ausência de carga externa. Curva de variação de resistência elétrica ($\Delta R/R$) em função da temperatura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 3 mostra uma curva típica ϵ -T obtida durante um ciclo de atuação térmica para um fio submetido a 125MPa. Observa-se o alongamento do fio atuador medido durante resfriamento assim como a contração por EMF durante aquecimento. O efeito memória de forma sob carga, aqui denominado Efeito Memória de Duplo Sentido Assistido (EMDSA) (do termo em inglês Stress Assisted Two-Way Memory Effect, SATWME), é definido como a diferença entre a posição à baixa temperatura (PBT) e a posição à alta temperatura (PAT). A curva da figure 3 corresponde a trajetória do atuador e uma deformação residual pode subsistir após o aquecimento. Comparando as figuras 2 e 3, observa-se que as temperaturas de transformação (M_s e A_f , neste caso) são mais altas quando uma carga é aplicada. Este aumento de temperatura apresenta uma variação linear em função da tensão mecânica e é típico das ligas com EMF (Funakubo, 1987). Cada fio

atuador submetido a uma dada carga externa foi pré ciclado com 20 ciclos de atuação térmica.

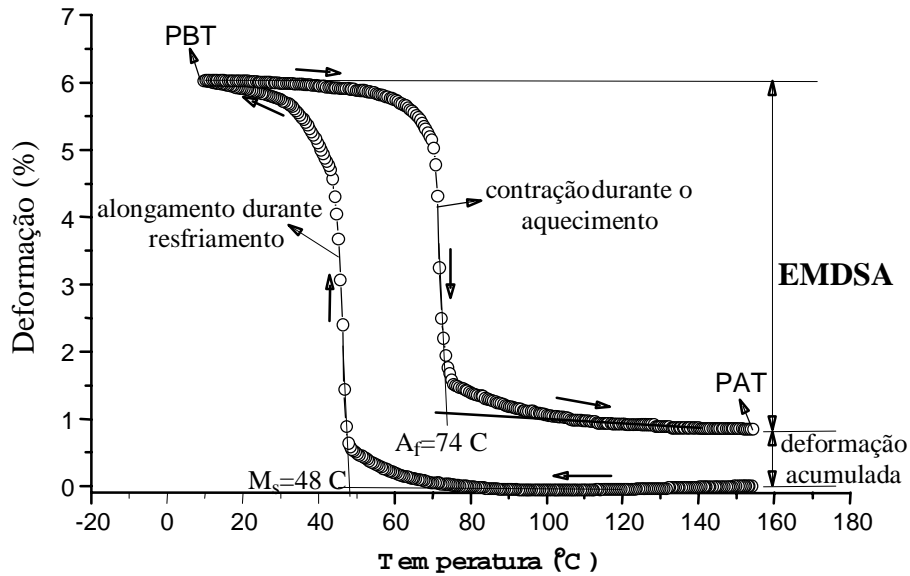


Figura 3 – Deslocamento do fio atuador em função da temperatura. Ciclo de atuação térmica para um carregamento correspondente a 125MPa.

A figura 4 compara os valores do EMDSA obtidos durante um ciclo de atuação térmica ($EMDSA_{120^\circ\text{C}}$) com aqueles medidos durante atuação elétrica por efeito Joule ($EMDSA_{\text{Joule}}$), logo após a operação de pré ciclagem.

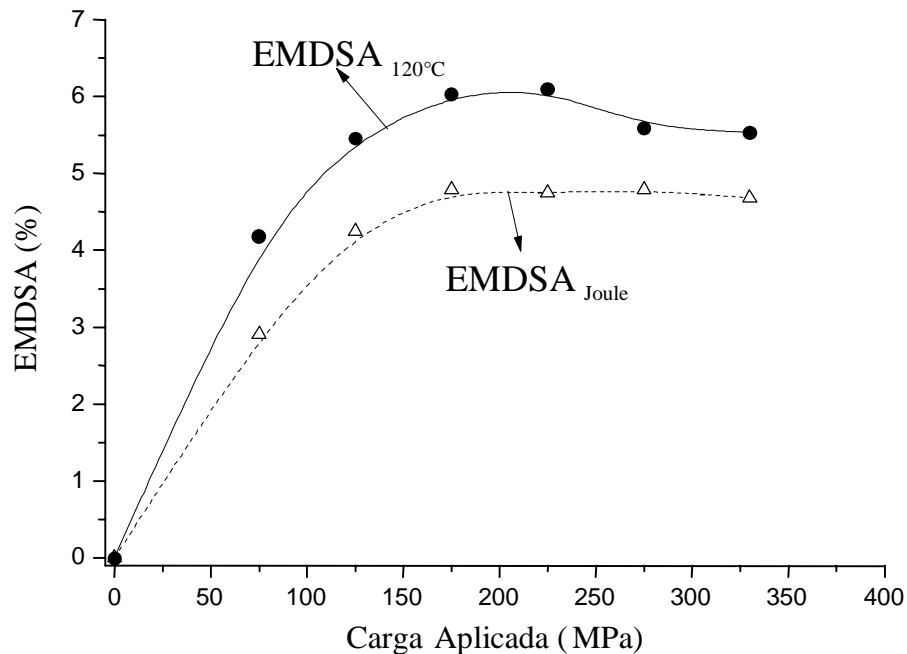


Figura 4 – EMDSA medidos durante um ciclo de atuação térmica ($EMDSA_{120^\circ\text{C}}$) e elétrica ($EMDSA_{\text{Joule}}$).

Para todos os níveis de carregamento observa-se que o deslocamento por EMDSA é maior quando o sistema da figura 1 trabalha como atuador térmico. No entanto, constata-se um ligeiro aumento da relação ($EMDSA_{Joule}/EMDSA_{120^{\circ}C}$) quando do aumento da carga aplicada. Esta relação passa de aproximadamente 0.70 para o carregamento menos intenso (75MPa) até 0.85 para carregamentos mais fortes. A figura 5 mostra claramente a diferença de performance entre o deslocamento obtido por atuação elétrica (máx. 8A) e aquele medido durante atuação térmica.

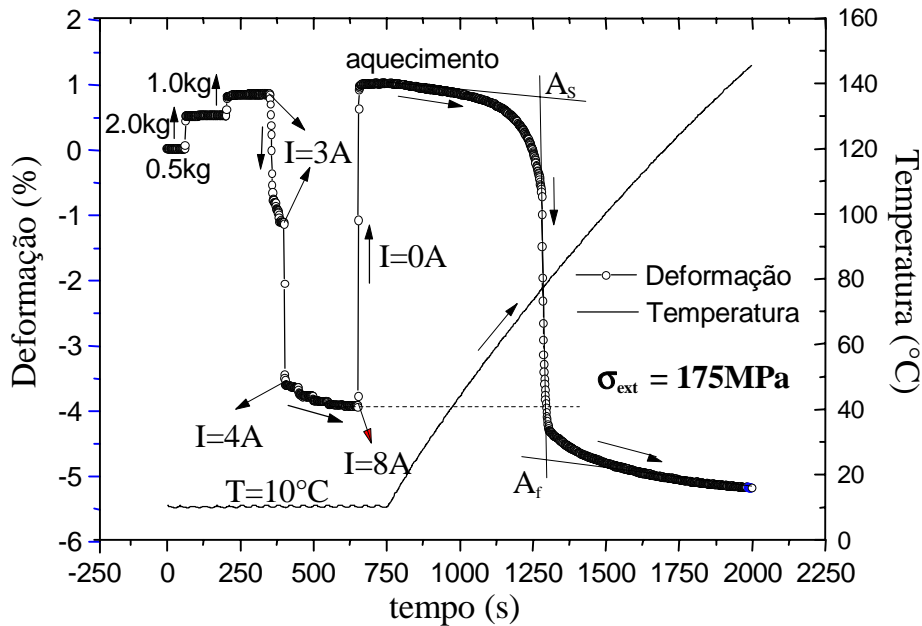


Figura 5 – Comparação entre a contração obtida por atuação elétrica e aquela obtida por atuação térmica.

Neste caso, um fio atuador de 0.5mm de diâmetro foi submetido a 175MPa (~3.5kg) e aquecido eletricamente enquanto seu deslocamento foi monitorado em função do tempo. Constata-se um aumento rápido da contração por EMDSA entre 3A e 4A seguido de um aumento mais lento entre 4A e 8A. A contração se satura para I=8A e a corrente é subitamente suspensa (I=0) para evitar um superaquecimento desnecessário. O EMDSA assim medido foi da ordem de 4.8%. Após suspensão da corrente e estabilização da deformação, o aquecimento usando o banho de óleo foi iniciado. Neste caso, o EMDSA medido a 120°C foi da ordem de 6%. A figura 5 evidencia que uma das razões pela qual a performance em EMDSA é melhor durante atuação térmica está relacionada a contração lenta e progressiva do fio mesmo depois de atingida a temperatura convencional de final da transformação de fase, isto é, o atuador continua a se contrair mesmo para $T > A_f$ durante o aquecimento com o banho de óleo.

Na realidade, o aquecimento rápido do fio atuador por efeito Joule dentro de um banho líquido frio ($T \sim 10^{\circ}C$) e agitado é menos homogêneo, no que diz respeito a transferência de calor, em comparação com o aquecimento por convecção forçada quando a temperatura do banho é aumentada gradualmente. De fato, Brinson *et al.* (1996) demonstraram teoricamente a formação de perfis de temperatura ao longo do comprimento do fio quando do aquecimento por corrente elétrica ao ar ambiente. Assim

sendo, uma simulação térmica simplificada do sistema da figura 1 foi realizada. Para isso foi utilizado o programa de elementos finitos Microfield. Para utilização segura do programa primeiramente o problema puramente térmico de Brinson *et al.* (1996) foi resolvido e a solução numérica encontrada foi totalmente compatível com a solução analítica apresentada por aqueles autores (De Araújo, 1999). Assim, o problema transitório puramente térmico que consiste do aquecimento do fio atuador Ti-Ni-Cu utilizando correntes situadas entre 5A e 9A dentro de um fluido agitado e mantido a 10°C foi resolvido. Para a resolução do problema, foram utilizadas as propriedades das ligas com EMF de base Ti-Ni encontradas na literatura (Brinson *et al.*, 1996) assim como as propriedades do óleo silicone para estimar o coeficiente médio de transferência de calor por convecção (h) no interior do banho da figura 1 (De Araújo, 1999). Os resultados desta simulação são mostrados na figura 6 juntamente com aqueles da variação da temperatura de final da transformação (A_f) em função do carregamento externo.

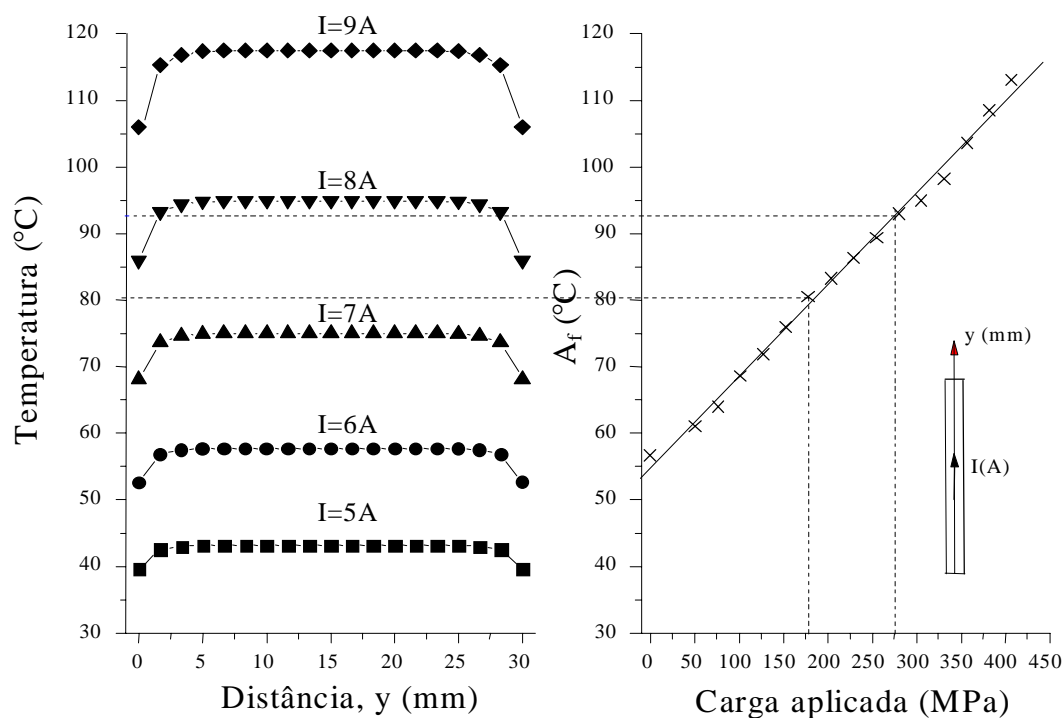


Figura 6 – Avaliação teórico-experimental dos aquecimentos elétrico e térmico. (a) resultados da simulação numérica mostrando os perfis de temperatura teóricos formados ao longo do comprimento do fio em função da corrente de aquecimento. (b) aumento da temperatura A_f (figura 3) em função da carga externa durante um ciclo de atuação térmica com o banho de óleo.

A formação dos perfis de temperatura ao longo do comprimento dos fios é confirmada na figura 6(a). Estes perfis tornam-se mais acentuados quando se aumenta a intensidade da corrente. Para 9A, por exemplo, a diferença de temperatura entre as extremidades e a região central do fio é da ordem de 11.5°C. Esta diferença pode ser ainda maior pois a simulação não levou em consideração que as extremidades do fio estão em contato

permanente com duas massas frias que formam as garras do sistema da figura 1. Mesmo considerando o aspecto qualitativo da simulação realizada, quando se compara as temperaturas estimadas na figura 6(a) com aquelas teoricamente necessárias para transformar completamente o fio atuador (A_f , figura 6b), os resultados são interessantes. Considerando o caso de um carregamento correspondente a 175MPa por exemplo, a figura 5 indica que com 8A a contração por EMDSA se estabiliza. Para 8A, a figura 6(a) mostra que a temperatura nas extremidades do fio atuador é de aproximadamente 85°C enquanto a região central está a 95°C. Porém, a figura 6(b) indica que neste caso a temperatura A_f é da ordem de 81°C e assim o fio atuador deve estar completamente transformado a 8A. No entanto, a figura 5 deixa claro que entre 81°C e 120°C ocorre ainda aproximadamente 1% de EMDSA que é impossível recuperar por aquecimento elétrico mesmo trabalhando a 9A. Assim, neste caso a contração lenta observada mesmo acima de A_f é a maior responsável pela melhor performance do sistema quando operado em modo atuador térmico. Para 275MPa e mantendo o nível de corrente máximo em 8A, a figura 6 mostra que o sistema operando em modo atuador elétrico não transformaria completamente o fio atuador e isso se adicionaria ao fenômeno de contração lenta mencionado acima.

Esta melhor performance do sistema da figura 1 em modo atuador térmico se mantém durante toda a vida útil do fio com EMF, sendo pouco afetada pelo número de ciclos realizados seguindo a lei de atuação definida na seção 2.1 (De Araujo *et al.*, 1998; De Araujo, 1999).

4. CONCLUSÕES

A concepção de um atuador relativamente simples, utilizando fios finos de uma LMF Ti-Ni-Cu segundo uma lei de atuação que permite a utilização do sistema seja como “atuador térmico”, seja como “atuador elétrico”, permitiu demonstrar experimentalmente, pela primeira vez, as diferenças de performance com relação ao deslocamento que pode ser obtido por EMF sob carga dependendo do modo de atuação empregado (térmico ou elétrico). Este trabalho deixa claro que eventuais projetos onde esses tipos de atuadores possam concorrer, devem necessariamente levar em consideração o modo de atuação empregado e seus diferentes aspectos, como a formação de perfis de temperatura no caso da atuação elétrica e a contração lenta do fio atuador, mesmo quando ultrapassada a temperatura convencional de fim da transformação de fase (A_f), no caso da atuação térmica.

Agradecimentos

Os autores agradecem a disponibilidade do Prof. Gérard Guénin que resultou em inúmeras discussões interessantes. C. J. De Araújo agradece o apoio da Capes durante seu doutoramento no INSA de Lyon – França (Proc. n° 0073/95-13).

REFERÊNCIAS

- Brinson, L. C., Bekker, A. and Hwang, S., 1996, Deformation of shape memory alloys due to thermo-induced transformation, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol.7, pp. 97-107.
- De Araújo, C. J., Morin, M. and Guénin, G., 1998, Some aspects of the cyclic behavior of SMA electro-thermal actuators, *Proceedings of the Second Japan-France Joint Seminar on Intelligent Materials and Structures*, Strasbourg (France). Anais a serem publicados.
- 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.
- Duerig, T. W., Stockel, D. and 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.
- Funakubo, H., 1987, *Shape Memory Alloys*, Gordon and 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.

COMPARISON BETWEEN THE ELECTRICAL AND THERMAL RESPONSES OF ACTUATOR WIRES WITH SHAPE MEMORY EFFECT

Abstract. *Wires fabricated with shape memory alloys presents an important potential for applications in intelligent and/or adaptable systems and robotic devices. In these cases, the displacement by shape memory effect (SME) can be obtained by electrical (Joule effect) or thermal actuation (forced convection, for example). This paper is especially dedicated to a comparative analysis of the performances of these two actuation modes which are alternatively applied on a same actuator wire, for different values of tensile loads. A simple electro-thermal actuator formed essentially of Ti-Ni-Cu wires loaded in uniaxial tension by weights was designed. The obtained results show that, for all external load levels, the displacement by SME is more large when the heating of the wire is performed by forced convection into a liquid environment in comparison with the displacement measured during electrical heating. In fact, for external loads between 75MPa and 400MPa, the SME under load obtained by Joule effect is between 70% and 90% of the one measured by forced convection. These results are discussed in terms of the heat transfer differences between the two actuation modes and the physical aspects related to the martensitic transformation associated to the SME phenomenon.*

Keywords: *Wires, shape memory effect, actuators.*