



PIBIC/CNPq/UFPG-2010

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA CINÉTICA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO DE FITAS E FIOS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Estephanie Nobre Dantas Grassi¹, Celso Rosendo Bezerra Filho², Carlos José de Araújo³, Luiz Fernando Alves Rodrigues⁴

RESUMO

As Ligas com Memória de Forma (LMF) são materiais ativos que possuem a capacidade de atuar como sensores e de agir gerando forças nos sistemas mecânicos através do Efeito Memória de Forma (EMF), que pode ser provocado por variações de temperatura. Em muitas situações práticas as variações de temperatura para ativação deste efeito é realizada aquecendo-se a liga por efeito Joule durante um certo intervalo de tempo, onde uma corrente elétrica passa através do material. Depois deste intervalo de tempo a corrente elétrica é desativada e a liga é resfriada, por exemplo, por convecção natural. O fato do EMF ser diretamente dependente da variação da temperatura tem-se por consequência que as características dos sensores e atuadores baseados nesse fenômeno também dependem desta variação. Este trabalho teve como objetivo estudar teórica e experimentalmente a dependência do perfil de temperatura com a corrente elétrica durante a transformação de fase de fitas de ligas com memória de forma. A análise é realizada para fitas da liga NiTi em função das suas dimensões, das propriedades térmicas e da corrente elétrica de ativação.

Palavras-chave: Ligas com Memória de Forma, Efeito Joule, Perfil de Temperatura

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF KINETICS OF HEATING AND COOLING OF WIRES AND RIBBONS WITH SHAPE MEMORY

ABSTRACT

Shape Memory Alloys (SMA) are active materials that present the capacity of actuate as sensors and mechanical force generators through the Shape Memory Effect (SME), that can be provoked by temperature variations. In many practical situations the temperature variations to activate this effect is performed by heating the material by Joule Effect during a certain time interval when an electric current passes through the alloy. After this time interval the electric current is turned off and the alloy is cooled, for instance, by natural convection. As SME is directly dependent on temperature variation, the characteristics of sensors and actuators based on this phenomenon are also dependent on this variation. This work had as objective the theoretical and experimental study of temperature profile dependence on electric current during phase transformation of ribbons with shape memory. The analysis was run to NiTi ribbons as a function of its dimensions, thermal properties and the electric current of activation.

Keywords: Shape Memory Alloys, Joule Heating Effect, Temperature Profile

¹ Aluna do Curso de Engenharia Mecânica, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: end.grassi@hotmail.com

² Engenharia Mecânica, Professor. Doutor, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: celso@dem.ufcg.edu.br *Autor para correspondências.

³ Engenharia Mecânica, Professor. Doutor, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: carlos@dem.ufcg.edu.br

⁴ Aluno do Mestrado em Engenharia Mecânica, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: luizalvescg@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

Nas ligas com memória de forma (LMF), principalmente à base de NiTi, ocorre uma transformação de fase do tipo martensítica termoelástica, em estado sólido, que lhes confere a capacidade única de recuperar deformações aparentemente plásticas de até 8% (OTSUKA, 1998), o que não ocorre nos metais clássicos, onde as deformações totalmente recuperadas são da ordem de 0,02% (CALLISTER, 1991). A transformação de fase em questão envolve duas fases sólidas: a austenita, fase presente em altas temperaturas, que apresenta maior rigidez; e a martensita, presente em baixas temperaturas, facilmente deformável. Essas fases sólidas são separadas por uma faixa estreita de temperatura (geralmente cerca de 10°C a 30°C) e além disso a transformação é reversível, o que torna possível e interessante sua aplicação em sistemas ativos.

Esses materiais atuam através de efeitos chamados de memória de forma simples (EMFS), memória de forma duplo (EMFD) e pseudoelasticidade. A recuperação da deformação é obtida através da variação da temperatura do material, ou pelo descarregamento mecânico no caso da pseudoelasticidade. A maioria dos atuadores fabricados com LMF são baseados no efeito memória de forma duplo descrito a seguir: o material numa temperatura abaixo da M_f (temperatura que marca o final da transformação martensítica), o que caracteriza o estado martensítico, está deformado. Quando aquecido até uma temperatura acima da A_f (temperatura que marca o final da transformação austenítica), caracterizando o estado austenítico, o material recupera totalmente a deformação sofrida. Quando resfriado novamente até atingir o estado martensítico, numa temperatura abaixo da M_f , o material se deformará, sem que tenha sido necessário aplicar novamente a carga mecânica. Em outras palavras, o material com EMFD memoriza duas formas, uma em cada fase cristalina (austenita, de alta temperatura, e martensita, fase de baixa temperatura).

Toda LMF apresenta inicialmente o EMFS, sendo necessário fazê-la passar por uma ciclagem através de um carregamento termomecânico específico, chamado de treinamento, para que adquira o EMFD. O uso de materiais que apresentam este efeito é vantajoso em sistemas atuadores porque após uma atuação basta cessar a fonte de energia térmica e promover seu resfriamento para que o elemento volte à forma original e esteja pronto para uma nova atuação. Além disso, as temperaturas de transformação de fase se estabilizam com o EMFD, melhorando o controle da ativação do elemento atuador.

As LMF estão ainda entre os materiais ativos que possuem as maiores densidades de energia de atuação (capacidade de realização de trabalho mecânico por unidade de volume), sendo capazes de gerar trabalhos da ordem de 10 MJ/m³. Entretanto, essas ligas possuem baixas velocidades de atuação, comparadas a outros materiais ativos, o que limita sua aplicação (LAGOUDAS, 2008).

Várias aplicações das LMF têm sido desenvolvidas em setores como o aeroespacial, médico-ortodôntico, automobilístico e robótico. Muitas destas aplicações são feitas utilizando-se o efeito Joule como meio de prover a energia térmica necessária à ativação do efeito memória de forma. A vantagem dessa forma de aquecimento é que a ativação dos elementos atuadores além de ser eficaz torna-se bastante simplificada e mais facilmente controlada. Para melhorar a transferência de calor as ligas são usadas principalmente sob a forma de fios e fitas, por permitirem o acionamento através de pulsos de corrente elétrica de intensidade relativamente baixa e de curta duração, principalmente quando se usa ligas a base de titânio (FURUYA & SHIMADA, 1990). Este tipo de ativação é bastante usado em sistemas mecânicos e microeletrônicos (do inglês, MEMs) que possuem ligas de NiTi em sua estrutura (YANG et al., 2009; EL-KHOURY et al, 2004; NAMAZU et al, 2005); em sistemas de controle de deslocamento e sensores de sobre-corrente (STRELEC et al, 2003); e até no sistema motor de um robô humanoíde composto de fios com memória de forma, desenvolvido na Universidade de Tecnologia Darmstadt (THE LARA PROJECT, 2006/2007).

O objetivo deste trabalho foi de estudar, teórica e experimentalmente, o perfil de temperatura medido em uma amostra de NiTi aquecida por efeito Joule, com a passagem de uma corrente elétrica, e resfriada por convecção natural, a partir do desligamento da fonte de corrente. Esta avaliação possibilitará avaliar quantitativa e qualitativamente a variação de parâmetros relevantes no desempenho dos atuadores de memória de forma.

Um experimento é realizado para medição da temperatura em uma amostra de material com memória de forma sujeito à ativação por efeito Joule e convecção natural. Para este experimento será usada uma amostra em forma de fita, possuindo o efeito memória de forma duplo. A forma de fita foi escolhida por se tratar de uma geometria bastante utilizada em aplicações que envolvem atuadores e pelas vantagens já descritas. O resultado deste experimento será usado para validar e melhorar o desempenho de um modelo matemático já previamente proposto e que foi integrado em ambiente computacional, utilizando o programa MATLAB®. Nele é possível variar os parâmetros como corrente elétrica, geometria e dimensões da amostra, parâmetros térmicos e observar graficamente os efeitos destas variações (DINIZ & DE ARAÚJO, 2007).

MATERIAL E MÉTODOS

Fase Experimental

Fabricação da amostra

Material Usado

Foi usada a liga comercial de NiTi da marca Memory-Metalle GmbH (Liga M) em forma de fio com 0,45 mm de diâmetro. Trata-se de uma liga atuadora com temperaturas de transformação de fase intermediárias (Af cerca de 65°C, indicado pelo fabricante).

Tratamento Térmico

No fio foi feito o tratamento térmico de betatização (700°C por 30 minutos) seguido de têmpera em água. Esse tratamento térmico é responsável por ativar o EMF na liga.

Laminação

O fio tratado foi submetido à laminação a frio até que uma fita com 0,08 mm de espessura e 1,32 mm de largura e aproximadamente 350 mm de comprimento fosse obtida. A cada três laminações feitas o material era submetido a um tratamento térmico a 450°C por 15 min para reduzir o efeito das tensões mecânicas introduzidas, que diminuía a capacidade do material de se deformar.

Treinamento

Para que apresentasse o EMFD e suas temperaturas de transformação de fase se estabilizassem a fita passou por um treinamento onde foi submetida a uma ciclagem térmica sob aplicação de uma tensão mecânica constante. Foi usada uma tensão de 200 MPa, suficiente para induzir a transformação de fase por tensão. Conhecendo a área transversal da fita, calculou-se para a aplicação desta tensão uma carga de 2,15 kg, que foi aplicada em tração. O aquecimento da fita foi feito através de efeito Joule com a aplicação de uma corrente elétrica de 0,7 A e o resfriamento ocorreu por convecção natural no ar. Foram realizados 600 ciclos de aquecimento e resfriamento como este, com o ligamento e desligamento da passagem de corrente elétrica.

Caracterização da Amostra

Ensaio RxT

A caracterização mais importante para as LMF dizem respeito às temperaturas de transformação de fase, que neste caso foram obtidas com ensaios RxT (resistência elétrica versus temperatura) em uma montagem utilizando o efeito Peltier (REIS, 2007). Este ensaio foi usado também para verificar a influência da soldagem capacitiva dos termopares na fita sobre seu efeito ativo. A vantagem de fixar os termopares com solda capacitiva é que a área de troca de calor da fita (área superficial) seria afetada minimamente. O ensaio foi realizado, portanto, em duas amostras: uma com termopares soldados e outra sem soldas.

Ensaio DSC

Foi também realizado um ensaio DSC (do inglês, Calorimetria de Varredura Diferencial) numa outra amostra da fita. Com este ensaio obteve-se a relação de variação da entalpia com a temperatura e através da seguinte expressão obteve-se a variação do Cp (calor específico à pressão constante) com a temperatura:

$$dh = c_p dT \quad \rightarrow \quad \frac{dh}{dt} = c_p \frac{dT}{dt} \quad \rightarrow \quad \frac{dh}{dt} \bigg/ \frac{dT}{dt} = c_p \quad (1)$$

Onde $\frac{dh}{dt}$ é o fluxo de calor por unidade de massa (W/g) e $\frac{dT}{dt}$ é a taxa de aquecimento (°C/min) usada no ensaio. Utilizou-se uma amostra de 1 mg e uma taxa de variação de 5 °C/min. Todas as unidades foram convertidas para o Sistema Internacional.

Preparação do Ensaio

Concepção e fabricação da bancada experimental

Para a realização do experimento foi concebida e fabricada uma bancada experimental onde a fita fica biengastada na posição horizontal, com a face onde os termopares são soldados voltada para cima. Esta bancada foi concebida para que permitisse também medição da força gerada durante a ativação do material, bastando-se introduzir uma célula de carga na montagem.

Aferição dos termopares

Os termopares foram aferidos para se ter certeza das medidas de temperaturas realizadas. Para isto utilizou-se um dispositivo onde a temperatura de uma certa quantidade de água (5 litros) era mantida constante em um banho termoregulável. A aferição dos cinco termopares usados para medição da temperatura na fita foi feita em cinco temperaturas diferentes do banho, a saber: 40°C, 43°C, 45°C, 48°C e 50°C. A aferição foi realizada com os termopares instalados na fita a ser testada.

Montagem e realização do experimento

A fita fabricada foi engastada nas duas extremidades como pode ser visto na Figura 1. Cinco termopares tipo K foram soldados por carga capacitiva sobre a fita e uma célula de carga da marca Alfa Instrumentos, modelo Z 250, com capacidade de 250 kg foi adicionada à montagem. Usou-se um sistema de aquisição de dados da marca Agilent, modelo 34970A para aquisição das temperaturas e da carga gerada, e uma fonte de corrente elétrica da mesma marca e modelo E3633A para alimentação de CC da fita. Preocupou-se ainda com o isolamento elétrico da bancada, apesar de sua resistência elétrica ser muito maior que a resistência elétrica da fita. Para efetuar este isolamento a parte cilíndrica das garras, com a qual a fita estaria em contato direto, foi envolvida em um filme polimérico usado no isolamento de motores elétricos. Para alimentação da célula de carga utilizou-se outra fonte de tensão no valor de 10 V.

Foram realizados três ensaios com correntes de 700, 800 e 900 mA, suficientes para aquecer a fita além das temperaturas de transformação de fase. Depois de observado o regime permanente (quando a temperatura na fita se estabilizava) a fonte de corrente era desligada e o resfriamento deu-se por convecção. Ao final de um ensaio, antes de começar o seguinte, aplicou-se um refrigerante aerossol sobre a fita para garantir que em todos os ensaios a fita estivesse inicialmente com a fase martensítica uniformizada. Esperou-se a temperatura da fita atingir a temperatura ambiente e só então o ensaio foi iniciado.

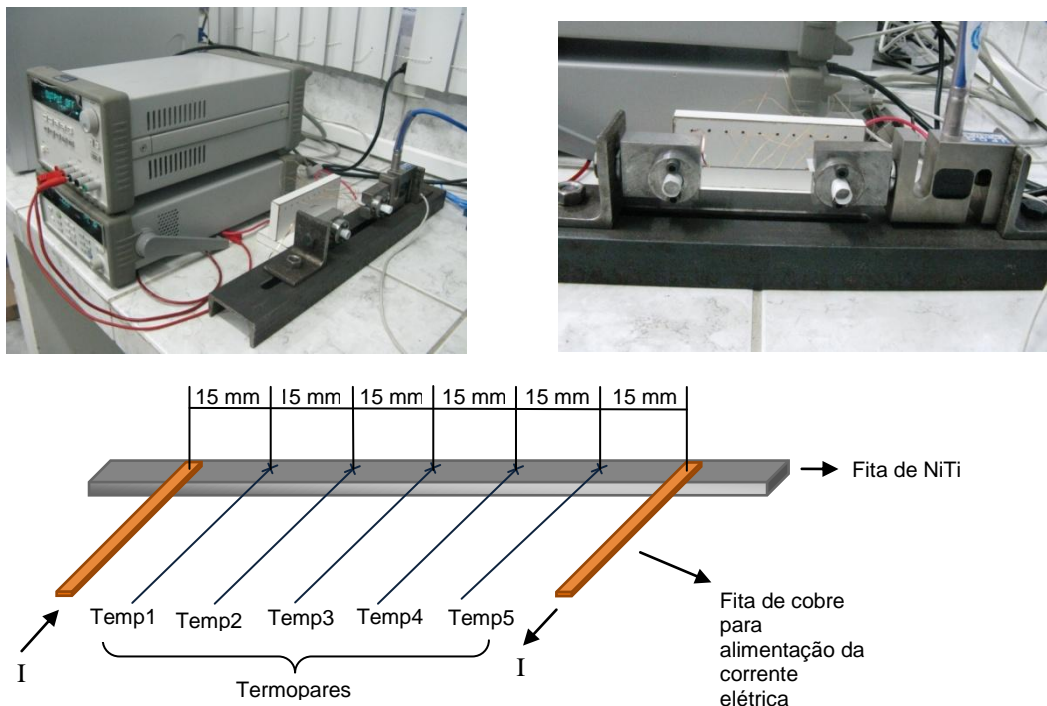


Figura 1 – Bancada experimental com a célula de carga adicionada e com a fita e os termopares fixados e esquema detalhando a montagem dos termopares sobre a fita e a alimentação da corrente elétrica.

Fase de Simulação

Mudanças propostas nos Programas transforSMA.mat e SMA01.mat

Os programas transfor.mat e SMA01.mat trabalham juntos na simulação da ativação de uma liga com memória de forma utilizando efeito Joule e transferência de calor por convecção. O primeiro é responsável pela interface gráfica onde serão informados os parâmetros da liga (geometria, temperaturas de transformação, materiais constituintes) e do ensaio ou aplicação (corrente elétrica de ativação, temperatura máxima, coeficiente de convecção); e também onde serão mostrados graficamente o perfil de temperatura com o tempo e os tempos totais de aquecimento e resfriamento.

O segundo programa é responsável por ler os parâmetros fornecidos e introduzi-los nas equações teóricas desenvolvidas na modelagem matemática para o cálculo dos vetores tempo e temperatura, que serão plotados no programa SMA01.mat.

No estudo desses programas observaram-se como características que a histerese existente entre as transformações de fase direta (resfriamento) e reversa (aquecimento) não era considerada, já que apenas as temperaturas A_s e A_f eram usadas no cálculo do vetor temperatura, tanto no aquecimento quanto no resfriamento. Essa aproximação pode ser boa, mas apenas para materiais que apresentam pequena histerese, limitando a utilização do programa.

Foi observado também, através do ajuste da curva obtida no ensaio DSC, que a escolha de um polinômio de segundo grau para representar a variação do C_p com a temperatura não era suficientemente boa. Foi proposto então um ajuste linear, dividido para dois intervalos de temperatura, como mostrado nas Figuras 4a e 4b mais adiante. Outra observação feita foi a de que o mesmo pico de C_p é usado para a transformação de fase direta e reversa. Como os picos observados no ensaio DSC são bastante diferentes optou-se por utilizar os picos das respectivas transformações.

Feitas as mudanças propostas simulou-se a ativação da fita fabricada com os parâmetros do experimento realizado e os resultados, experimental e computacional, foram comparados. As propriedades termofísicas usadas na simulação são mostrados na Tabela 1 abaixo:

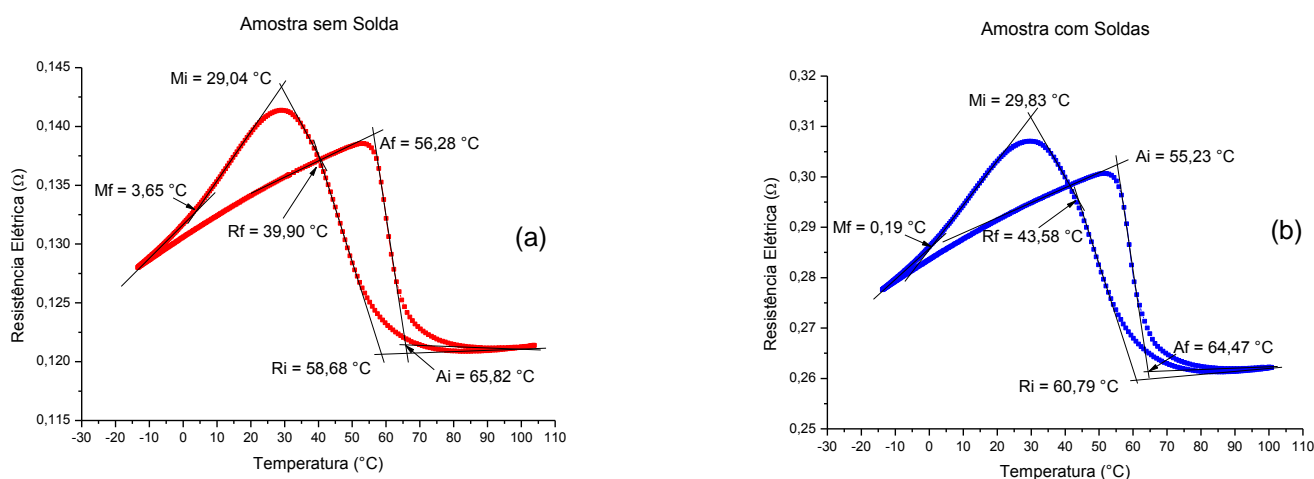
Tabela 1 – Propriedades termofísicas usadas na simulação da ativação da liga.

Propriedade	Unidade	Valor
Calor específico, C_p	J/kg°C	570 no aquecimento 3240 no resfriamento ^A
Coefficiente de convecção, h	W/m ² °C	10 ^B
Resistividade elétrica, ρ_{el}	Ohm.m	725 x 10 ⁻⁹ C
Densidade, ρ	Kg/m ³	6500 ^C

A - dados experimentais, B - dados estimados, C - dados usados na literatura (BRAILOVSKI, 1996)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As temperaturas de transformação de fase da fita fabricada obtidas no ensaio RxT podem ser observadas na Figura 2a abaixo. Na Figura 2b observam-se as mesmas temperaturas, mas para a amostra da fita com os termopares soldados. Na Figura 2c pode-se observar a sobreposição das curvas e a pouca influência das soldas é melhor visualizada.



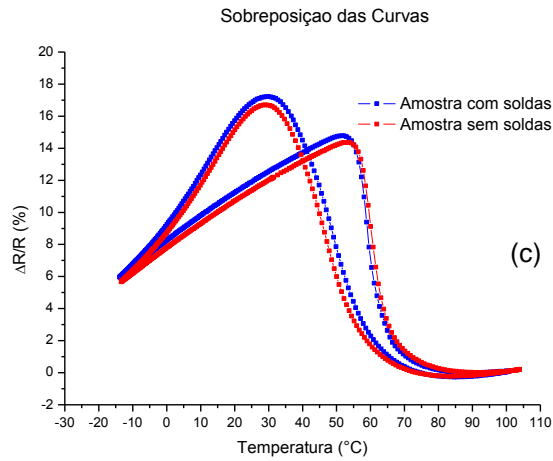


Figura 2 – Curvas obtidas no ensaio RxT com amostras da fita de NiTi fabricada. Em (a) observa-se a curva da amostra sem soldas e em (b) da amostra com soldas. Em (c) observa-se a sobreposição das curvas.

Com uma variação máxima de cerca de 3,5 °C nas temperaturas de transformação pode-se desprezar o efeito das soldas sobre o EMF da fita.

A Figura 3 mostra a curva obtida no ensaio DSC. A fita apresentou resultado esperado para ligas de NiTi, onde a fase-R geralmente está presente. (LAGOUDAS, 2008).

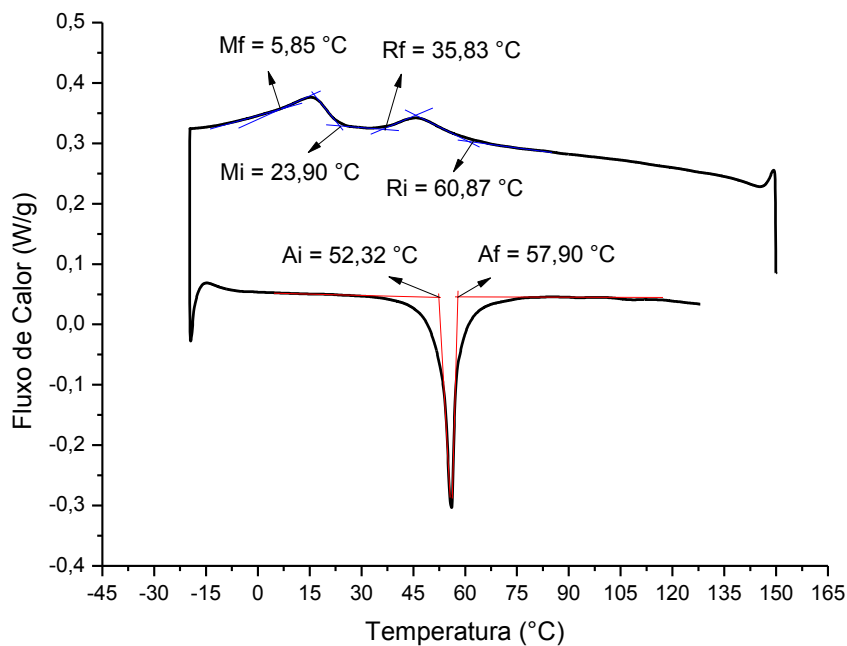


Figura 3 – Curva obtida em ensaio DSC mostrando as temperaturas de transformação de fase.

Da curva obtida no ensaio DSC foi calculada a variação do c_p com a temperatura pela expressão da equação (1), fazendo as devidas conversões de unidade para o Sistema Internacional. As curvas de $c_p \times T$ para o aquecimento e resfriamento podem ser vistas na Figuras 4a e 4b, juntamente com o ajuste linear usado para simulação e o ajuste com um polinômio de segundo grau, usado no programa original.

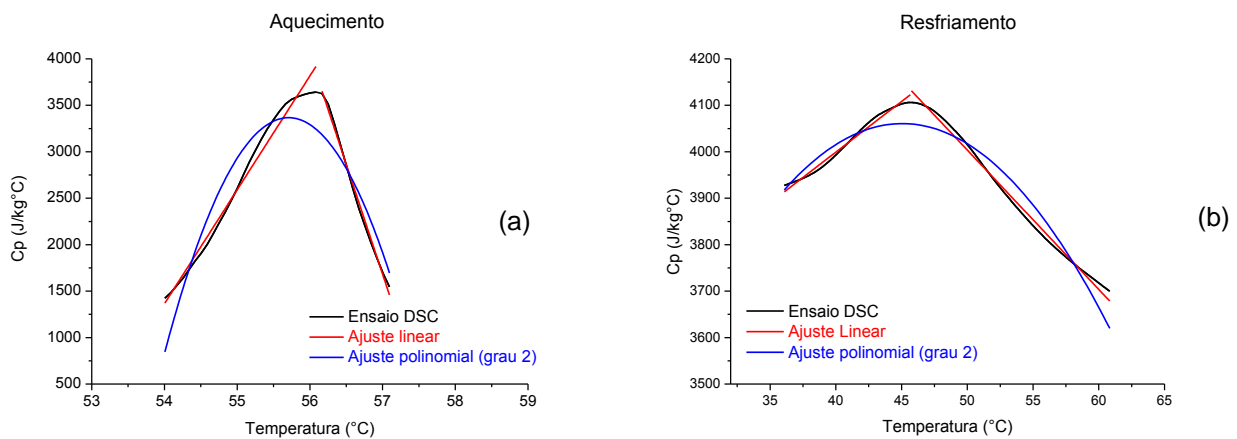


Figura 4 – Variação do calor específico com a temperatura durante as transformações de fase (a) reversa (aquecimento) e direta (resfriamento) e ajuste linear e polinomial das curvas.

Na aferição dos termopares, feita em cinco temperaturas diferentes, a diferença de temperatura observada entre a leitura do termopar e a temperatura do banho foi de $0,13^{\circ}\text{C} \pm 0,01037^{\circ}\text{C}$, o que representa uma precisão satisfatória.

As Figuras 5a, 5b e 5c abaixo mostram a distribuição de temperatura sobre a fita durante o aquecimento e o resfriamento para as três correntes de ativação estudadas. Nos três casos, gradientes de até 55°C foram observados, sendo que para as correntes maiores, esses gradientes foram maiores. A Figura 5d mostra a carga gerada em função do tempo, também para os três valores de corrente.

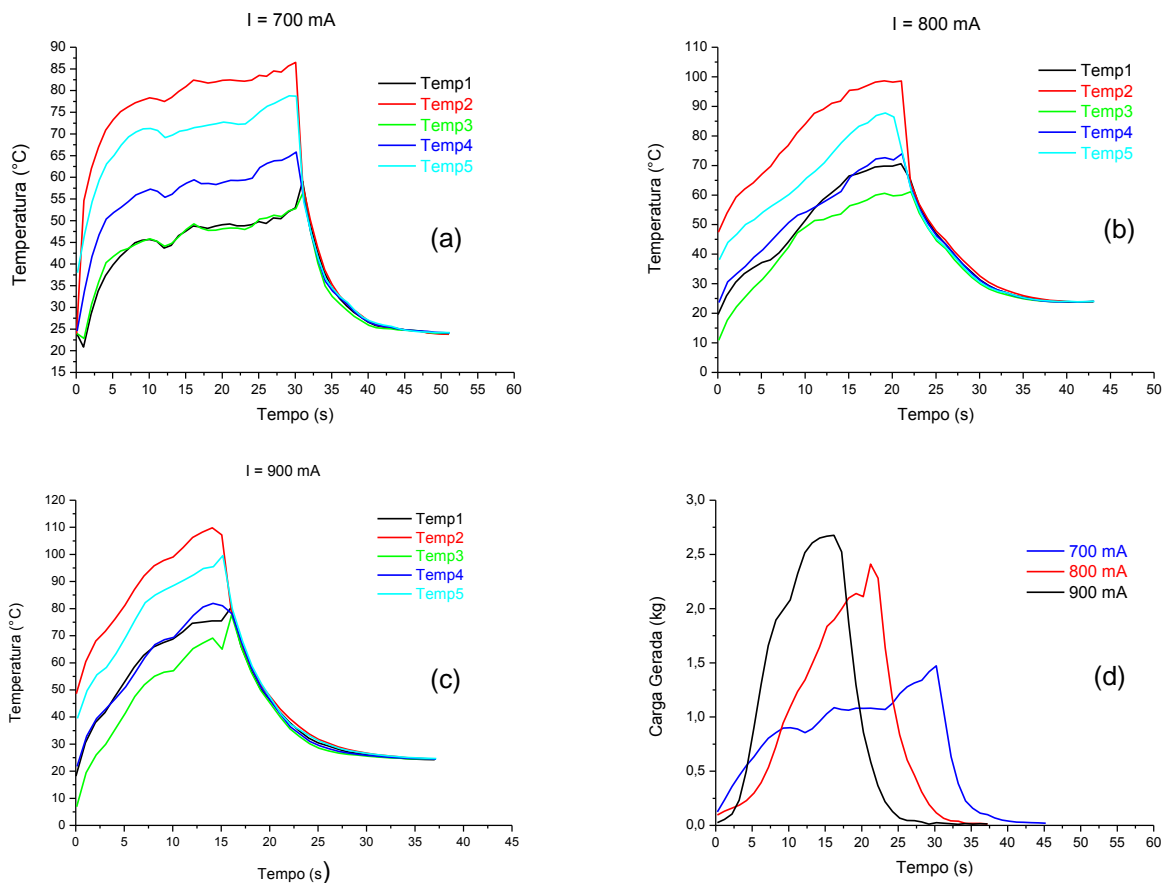


Figura 5 – Distribuição de temperatura sobre a fita para (a) 700 mA, (b) 800 mA e (c) 900 mA. (d) Carga gerada em kg em função do tempo para as correntes de ativação usadas.

Observa-se que a carga gerada é diretamente proporcional à temperatura, o que é esperado já que a geração de força provém da transformação de fase ativada pela variação da temperatura. Para a corrente de 900 mA a transformação de fase foi mais completa e por isso a carga gerada foi maior. Outro resultado

importante é que o tempo para a ativação (aquecimento) é afetado pela corrente elétrica, sendo menor para correntes maiores (cerca de 15s para $I=900$ mA, 20s para $I=800$ mA e 30s para $I=700$ mA, pois quanto mais energia se entrega ao sistema, mais rápido a temperatura se eleva).

As Figuras 7, 8 e 9 mostram a curva obtida experimentalmente (onde ocorreram os maiores níveis de temperatura na fita), a curva simulada pelo programa antes das modificações propostas (programa original) e a curva simulada pelo programa após feitas as modificações (programa modificado) para as correntes elétricas de ativação de 700 mA, 800 mA e 900 mA. Uma observação importante a ser feita é que o ensaio foi realizado em temperatura ambiente de 22°C, o que não permite a observação da transformação martensítica completa para a liga usada ($M_f = 5,85^\circ\text{C}$). Foi observada a transformação parcial da fase-R ($R_s=60,87^\circ\text{C}$ e $R_f=35,83^\circ\text{C}$). As temperaturas de transformação direta (M_s e M_f) fornecidas ao programa SMA01.mat foram então R_s e R_f .

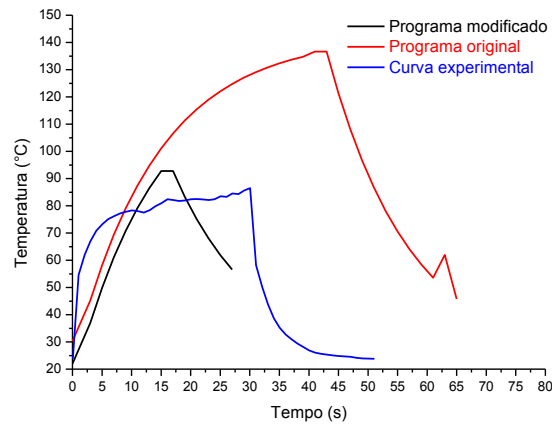


Figura 7 – Curvas experimental e simuladas para uma corrente elétrica de ativação de 700 mA.

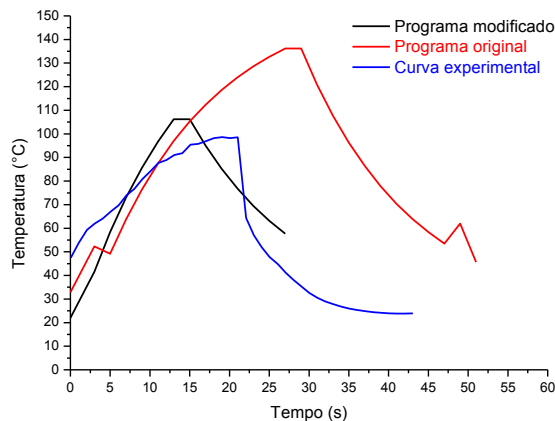


Figura 8 – Curvas experimental e simuladas para uma corrente elétrica de ativação de 800 mA.

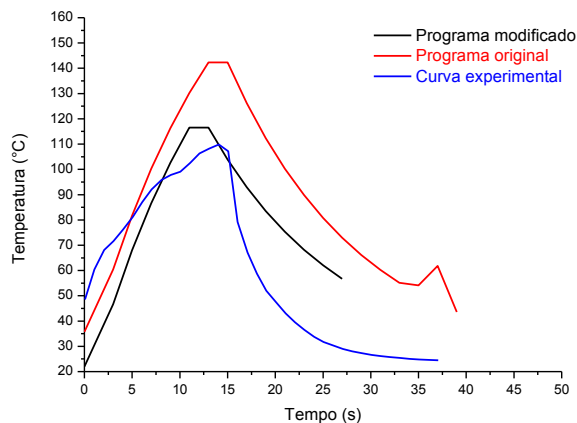


Figura 9 – Curvas experimental e simuladas para uma corrente elétrica de ativação de 900 mA.

Houve uma melhora na estimativa do tempo de aquecimento para os três valores de corrente usados, sendo melhor para correntes maiores. Já a estimativa do tempo de resfriamento não foi tão boa em nenhum dos três casos, pois o resfriamento deu-se mais rapidamente no experimento. Contudo, de forma geral, houve uma melhora na simulação do tempo de ativação e resfriamento com as modificações propostas ao programa. As diferenças ocorridas entre experimento e simulação podem ser atribuídas aos seguintes fatores:

- O modelo matemático usado considera a temperatura do material como sendo uniforme, tendo as extremidades isoladas termicamente. Em aplicações práticas não é o que ocorre, pois o elemento sempre estará sujeito a um tipo de engaste para ativar algum movimento ou gerar força. Como resultado disto, a consideração de uma distribuição apenas temporal é falha, o que provoca diferenças importantes entre o modelo e os experimentos.
- As propriedades termofísicas do material são consideradas constantes no modelo nos trechos onde não existem transformações de fase, o que pode ser uma boa aproximação para elementos de estrutura cristalina uniforme. Esta consideração é razoável para um elemento que sofreu laminação a frio.

CONCLUSÃO

A cinética de aquecimento e resfriamento de atuadores com memória de forma é intimamente dependente da geometria do atuador e de sua capacidade de troca de calor com o ambiente. O gradiente de temperatura na amostra faz com que a transformação de fase ocorra de forma não uniforme no elemento, podendo retardar sua atuação. Isto pode ser minimizado melhorando-se a uniformidade do material e de sua geometria, e também a temperatura ambiente nas proximidades do atuador.

Os resultados mostraram que o programa Thermal Activation of SMA Actuators apresentou melhores resultados após as modificações sugeridas terem sido introduzidas no modelo computacional, se aproximando mais dos resultados observados experimentalmente. Contudo, os resultados melhoraram à medida que foram usadas correntes elétricas de atuação de maior intensidade.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo financiamento do projeto e pela concessão da bolsa PIBIC;

Aos colegas do Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, onde este projeto foi desenvolvido e realizado, por todo apoio e contribuição;

Aos professores Celso e Carlos pela orientação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAILOVSKI, V., TROCHU, F., DAIGNEAULT, G. Temporal characteristics of memory linear actuator and their applications to circuit breaks. *Materials & Design*, 1996, v. 17, p. 151-158.

CALLISTER Jr, William D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. John Wiley & Sons, Inc., 5ª Edição, Nova York, NY, 1991.

DINIZ, M. S., DE ARAÚJO, C. J., 2007. Modelagem e simulação da ativação elétrica de elementos de ligas com memória de forma (LMF). Relatório Técnico Final de Bolsista ITI-1A. Processo CNPq nº 55.0325/2005-0.

FURUYA, Y., SHIMADA, H., 1990. Shape Memory Actuators for Robotic Applications. *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, *Materials & Design*, v. 12, p. 338-354.

LAGOUDAS, D. C., 2008. *Shape Memory Alloys – Modeling and Engineering Application*. Springer, Texas, USA.

OTSUKA, K., WAYMAN, C.M., 1998. *Shape Memory Materials*. Edited by K. Otsuka and C. M. Wayman, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

REIS, Rômulo Pierre Batista dos. Desenvolvimento de um sistema de caracterização de ligas com memória de forma utilizando o efeito termoelétrico. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2007. 51f.

STRELEC, J. K., LAGOUDAS, D. C., KHAN M. A., YEN, J., 2003. Design and implementation of a shape memory alloy actuated reconfigurable wing. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 14, p. 257-273.

YANG, S. Y., KANG, S. W., LIM, Y. M., LEE, Y. J., KIM, J. I., NAM T. H., 2009. Temperature profiles in a Ti-45Ni-5Cu (at%) shape memory alloy developed by the Joule heating. *Journal of Alloys and Compounds*. v. 419, p. L28-L32.

THE LARA PROJECT, 2006/2007. Disponível em < <http://www.lara-robot.de/> >. Acesso em 10 julho 2010.

EL-KHOURY, George K., HOTAIT, Mohammad A. SMA Actuated RF MEMS Switch. Department of Mechanical Engineering, American University of Beirut, Beirut- Lebanon. Disponível em < <http://webfea.fea.aub.edu.lb/proceedings/2004/SRC-ME-10.pdf> >. Acesso em 27 maio 2010.

NAMAZU, T. INOUE, S. TASHIRO, Y. OKAMURA, Y. KOTERAZAWA, K. Ti-Ni SMA film actuated Si cantilever beams for MEMS probe card. In: *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*. Seul, Coréia, Junho 2005. p 733 - 736 Vol. 1