

MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM ATUADOR DE LIGA DE MEMÓRIA DE FORMA

MARCELO FRANCISCO MAESTÁ* , GUSTAVO LUIZ C. M. DE ABREU* , VICENTE LOPES JR.*

* *Universidade Estadual Paulista - UNESP*

*Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Brasil, 56, Centro, Ilha Solteira-SP, Brasil*

Email: mhmaesta@gmail.com, gustavo@dem.feis.unesp.br, vicente@dem.feis.unesp.br

Abstract— Shape memory alloys (SMAs) are metal alloys capable of converting thermal energy into mechanical energy, and once deformed permanently, such materials can return to their original shape through the heat. This paper aims to model an actuator of shape memory alloy and investigate some constitutive models of SMA in the scientific literature.

Keywords— Shape memory alloy (SMA), SMA wire, dynamic model, experimental validation.

Resumo— Ligas de memória de forma (LMF) são ligas metálicas capazes de converter energia térmica em energia mecânica e, uma vez deformados permanentemente, estes materiais podem retornar às suas condições originais de forma através de seu aquecimento. Neste trabalho pretende-se modelar um atuador de liga de memória de forma e investigar alguns modelos constitutivos de LMFs existentes na literatura.

Palavras-chave— Liga de memória de forma (LMF), fio de LMF, modelo dinâmico, validação experimental.

1 Introdução

Os materiais com memória de forma são ligas metálicas capazes de recuperar a geometria original ou de desenvolver consideráveis forças de restituição ao se restringir sua recuperação, através da imposição de um campo de temperatura e/ou de tensão, devido a transformações de fase induzidas no material (Paiva, 2004). Geralmente, estes materiais podem ser facilmente deformados de forma aparentemente plástica a uma temperatura relativamente baixa e, ao serem expostos a uma temperatura mais elevada, retomam a forma inicial.

De uma maneira geral, as Ligas de Memória de Forma (LMFs) apresentam baixa resistência à fadiga quando comparadas aos aços carbono comum. Visando melhorar esta propriedade, atualmente, pesquisas vêm sendo desenvolvidas sobre o efeito da adição e combinação de certos elementos de ligas. Uma outra característica destas ligas é o tempo de resposta relativamente elevado. Em situações em que se necessita de uma resposta rápida existem outros materiais inteligentes, como os piezelétricos, que podem apresentar resultados mais satisfatórios. Vale ressaltar, no entanto, que as LMFs são capazes de gerar grandes forças de restituição com um consumo de energia relativamente baixo, o que é uma característica que as diferenciam em diversas aplicações (Wu e Schetky, 2000).

O desenvolvimento de atuadores com as LMFs apresenta grandes atrativos para diversos campos da engenharia, principalmente na área de robótica (Wu e Schetky, 2000; Ashrafiun et al., 2006; Romano e Tannuri, 2009; Kannan et al., 2013), substituindo os atuadores convencionais de grande peso e ruidosos, como motores e válvula sole-

noides. Os atuadores baseados em LMF possuem a maior relação de carga útil por peso do atuador em relação aos atuadores convencionais (Faria et al., 2012; Abreu et al., 2014). Entretanto, em alguns casos práticos, o desempenho dinâmico dos atuadores com LMF é considerado insuficiente devido ao elevado tempo de resposta (Kannan et al., 2013). Para a LMF operar rapidamente, deve-se aquecê-la para haver a contração e resfriá-la na recuperação. O aquecimento é um processo simples e rápido, podendo ser feito com a passagem de corrente elétrica pelo fio de LMF (Leo, 2007). Já o resfriamento pode ser realizado mediante a instalação de um sistema de dissipação de calor forçada (Romano e Tannuri, 2009).

Neste trabalho é apresentado inicialmente o comportamento termomecânico das Ligas de Memória de Forma (LMF) de *Ni-Ti* e o efeito de memória de forma. O trabalho finaliza com a validação do modelo dinâmico proposto para um atuador de LMF construído.

2 Modelo de Transformação de Fase

Existe uma quantidade bastante expressiva de modelos propostos para descrever a transformação de fase (entre martensita e austenita e vice-versa) das LMFs. Há modelos que utilizam, por exemplo, funções exponenciais (Boyd e Lagoudas, 1994; Ikuta et al., 1991) para descrever a transformação de fase. Existem outros modelos que utilizam funções cossenoidais (Liang e Rogers, 1991) e ainda acrescentam a variação nas temperaturas de transformação em função da tensão mecânica aplicada nas LMFs (Paiva, 2004). O modelo de Brinson (1993), semelhante a Liang e Rogers, utiliza funções cossenoidais para a trans-

formação de fase, porém apresenta uma inovação separando a martensita em martensita maclada e não-maclada. Os modelos citados acima são só alguns dos inúmeros modelos encontrados na literatura que tentam modelar a transformação de fase entre martensita e austenita.

No presente trabalho propõe-se a utilização do modelo de (Ikuta et al., 1991) para as transformações de fase, expressas pelas relações:

$$\xi_h = \frac{\xi_M}{1 + \exp \left[\frac{6.2}{A_f - A_s} \left(T - \frac{A_f + A_s}{2} \right) \right]} \quad (1)$$

$$\xi_c = \frac{1 - \xi_A}{1 + \exp \left[\frac{6.2}{M_s - M_f} \left(T - \frac{M_f + M_s}{2} \right) \right]} + \xi_A \quad (2)$$

onde, ξ_h e ξ_c são, respectivamente, a fração martensita durante a transformação de fase de martensita para austenita e da austenita para martensita; A_s é a temperatura de início da transformação em austenita; A_f é a temperatura final da transformação em austenita; M_s é a temperatura de início da transformação em martensita; M_f é a temperatura final da transformação em austenita; ξ_M é o valor inicial da martensita no início do aquecimento e ξ_A é o valor inicial da martensita no início do resfriamento.

3 Modelo Térmico

A mudança de temperatura no fio de LMF é realizada através do efeito *Joule*. Deste modo, é necessário estabelecer um modelo matemático que relacione a variação da temperatura em função da corrente elétrica aplicada. Para definir um modelo térmico apropriado, alguns fatores não foram considerados, tais como: a perda de calor por radiação e condução.

Um modelo usualmente empregado que relaciona a transferência de calor com o aquecimento elétrico de um fio (efeito *Joule*) é dado por (Leo, 2007):

$$(\rho A) c_p \frac{dT(t)}{dt} = I^2 R - h_c A_c [T(t) - T_\infty] \quad (3)$$

onde ρ é a densidade da LMF; A é a área da seção transversal ($A = \frac{\pi d^2}{4}$, onde d é o diâmetro do fio); c_p é o calor específico do fio de LMF; R é a resistência elétrica por unidade de comprimento; h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção e A_c é a área de troca de calor por unidade de comprimento. A temperatura ambiente é definida como T_∞ e I é a corrente elétrica aplicada.

A resistência elétrica do fio de LMF pode ser considerada análoga à de um fio condutor convencional, isto é:

$$R_{eq} = \rho_{el} \frac{L}{A} \quad (4)$$

onde, R_{eq} é a resistência elétrica no fio, ρ_{el} é a resistividade do material em $\Omega.m$ e L é o comprimento do fio.

Com base na Eq. (4), a resistência elétrica do fio de LMF (R), por unidade de comprimento, pode ser calculada pela expressão:

$$R = \frac{\rho_{el}}{A} \quad (5)$$

Segundo (Gil e Planell, 1998), as LMFs sofrem alterações em suas propriedades físicas que dependem da estrutura cristalina do material. Deste modo, foram considerados valores distintos do calor específico e da resistividade para as fases martensita e austenita. Assim foi feita uma analogia com a equação proposta por (Brinson, 1993) para o módulo de elasticidade. Tal equação, representa uma variação do módulo de elasticidade em função da fração martensita (ξ), que indica quando o material está na fase austenita ($\xi = 0$), na fase martensita ($\xi = 1$) ou em uma fase intermediária ($0 < \xi < 1$).

Para a resistividade elétrica, (Elahinia e Ahmadian, 2005) propuseram a utilização da Eq. (6) para descrever a variação da resistividade elétrica em função da fração martensita ξ , onde é possível notar uma similaridade com a equação do módulo de elasticidade de (Brinson, 1993):

$$\rho_{el} = \rho_{el_A} + \xi(\rho_{el_M} - \rho_{el_A}) \quad (6)$$

onde ρ_{el} é a resistividade elétrica total do material e ρ_{el_M} e ρ_{el_A} são, respectivamente, as resistividades na fase martensita e austenita.

Em relação à variação do calor específico (C_p), (Liu et al., 2010) propuseram uma equação para o calor específico para a fase martensita e um para a fase austenita, em função do comprimento da LMF. Assim, com base no trabalho de (Liu et al., 2010) e fazendo uma analogia com a equação de (Brinson, 1993), o presente trabalho propõe um calor específico em função da transformação de fase martensita (ξ), conforme mostrado abaixo:

$$C_p = C_{p_A} + \xi(C_{p_M} - C_{p_A}) \quad (7)$$

onde C_{p_M} e C_{p_A} são, respectivamente, os valores específicos na fase martensita e austenita.

O coeficiente de transferência de calor por convecção (h_c) é um parâmetro que depende principalmente da diferença de temperatura do material em relação ao fluido e a geometria do corpo. Na literatura, diversas são as estimativas para a obtenção do coeficiente de transferência de calor por convecção. Uma dessas estimativas é dada por (Holman, 1999):

$$h_c = 1.32 \left[\left(\frac{T_{op} - T_\infty}{d} \right)^{1/4} \right] \quad (8)$$

onde T_{op} é a temperatura de operação da LMF em °C e h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção em $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$.

4 Atuador de Liga de Memória de Forma

Para validar os modelos teóricos apresentados para um fio de LMF submetido   tensões mecânicas, foi construído um atuador de fio de LMF (veja Fig. 1) de 0.5 mm de diâmetro, com comprimentos inicial de 230 mm e final de aproximadamente 237 mm (*Memry Corporation*).

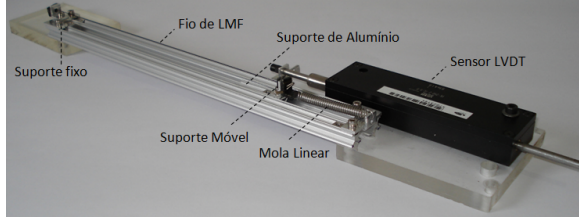


Figura 1: Atuador de LMF construído.

No protótipo construído (Fig. 1), o fio de LMF (fabricante *Nitinol*) está fixado em uma extremidade no suporte fixo da estrutura de alumínio, por intermédio de um conector elétrico. A fun o da corrente elétrica   alterar a temperatura dos atuadores através do efeito *Joule*, modificando a forma da liga. Sua outra extremidade   fixada em um outro suporte preso a um pequeno dispositivo de alumínio (suporte móvel) que se desloca linearmente ao longo de uma guia linear. Uma mola   conectada a este dispositivo com o intuito de promover o estiramento da liga. O sistema de medida   feito por um sensor de posi o (modelo PE-250-2-IE-S-D da *US Digital*) conectado a um suporte preso ao dispositivo móvel.

O objetivo deste experimento   validar os modelos térmico e de transforma o de fase do atuador de LMF construído.

4.1 Modelo Dinâmico do Atuador

No sistema apresentado na Fig. 1, deseja-se encontrar a equa o matemática que relacione a posi o do suporte móvel em fun o da corrente elétrica aplicada no fio de LMF. Para isto, considera-se o mecanismo da Fig. 1 como um sistema de um grau de liberdade, conforme mostra o desenho esquemático abaixo.

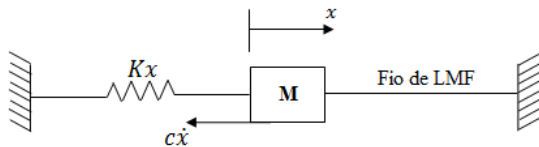


Figura 2: Desenho esquemático do atuador de LMF.

Aplicando a segunda lei de Newton, a equa o dinâmica de movimento do sistema pode ser expressa por:

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + Kx = F_{LMF} \quad (9)$$

onde M   a massa do suporte móvel, c   o coeficiente de atrito viscoso entre o suporte móvel e a guia linear, K   a rigidez da mola linear e F_{LMF}   a força gerada pelo fio de LMF.

Para o cálculo da força gerada pelo fio de LMF, o mesmo foi considerado como uma mola não linear de rigidez K_{LMF} . Para isto, foram assumidos os seguintes dados (veja Fig. 3):

- na fase austenita, o fio de LMF tem comprimento L_o ;
- na fase martensita, o fio de LMF tem comprimento L_f e corresponde   posi o $x = 0$ do atuador e
- para uma fase intermediária entre a austenita e martensita, tem-se o alongamento do fio de LMF de $\Delta L = \epsilon_L L_f - x$, onde ϵ_L   a máxima deforma o residual.

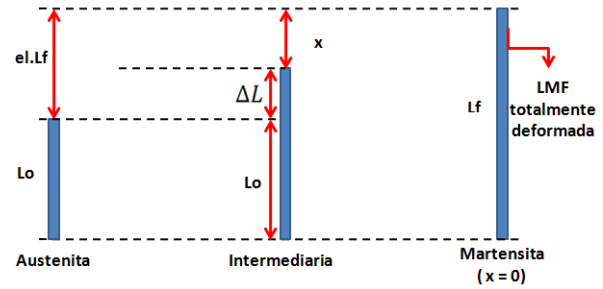


Figura 3: Tipos de comportamento do fio de LMF.

Com base nas três considera es citadas acima, a força gerada pelo fio de LMF pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$F_{LMF} = K_{LMF}\Delta L = K_{LMF}(\epsilon_L L_f - x) \quad (10)$$

onde x   a posi o do atuador de LMF.

Pela análise da Eq. (10), torna-se necessário definir a rigidez do fio de LMF em fun o da fra o martensita (ξ). Assim, considerando a tensão mecânica gerada pelo fio de LMF dado por (Romano e Tannuri, 2009):

$$\sigma = \xi \epsilon Y_M + (1 - \xi) \epsilon Y_A \quad (11)$$

onde, ξ   a fra o martensita; Y_M e Y_A são os módulos de elasticidade na fase martensita e austenita, respectivamente e ϵ   a deforma o do fio.

E assumindo Y_A consideravelmente maior que Y_M , tem-se:

$$\sigma = (1 - \xi) \epsilon Y_A \quad (12)$$

Substituindo $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_o}$ e $\sigma = \frac{F_{LMF}}{A}$ na Eq. (12), chega-se:

$$\frac{F_{LMF}}{A} = (1 - \xi) \frac{\Delta L}{L_o} Y_A \quad (13)$$

Sabendo que $K = \frac{F}{\Delta x}$ e fazendo as manipulações algébricas necessárias, pode-se definir a seguinte expressão:

$$K_{LMF} = (1 - \xi) Y_A \frac{A}{L_o} \quad (14)$$

A equação (14) representa a rigidez não linear de um fio de LMF.

Substituindo a Eq. (14) em (10) e o resultado em (9), tem-se a equação do movimento do atuador de LMF, reescrita na forma:

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + (K + K_{LMF})x = K_{LMF}\epsilon_L L_f \quad (15)$$

5 Fonte de Corrente Controlável

Uma fonte de corrente elétrica controlável (modelo Lord RD-3002-1) foi utilizada para aquecer o fio de LMF, na faixa de 0 a 2 A, através da aplicação de uma tensão elétrica de entrada (faixa de 0 a 5 V). De acordo com a curva de calibração fornecida pelo fabricante, a relação entre a tensão elétrica de entrada (u) e a corrente elétrica de saída da fonte (I) é dada pela relação:

$$I = 0.4643(u - 0.6) \quad (16)$$

6 Validação do Modelo do Atuador

O atuador de LMF construído (veja Fig. 1) apresenta um diâmetro de fio de $d = 0.5 \text{ mm}$ e uma mola com constante de rigidez igual a $K = 565 \frac{\text{N}}{\text{m}}$. A densidade ($\rho = 6500 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$) e o módulo de elasticidade ($Y_A = 75 \text{ GPa}$) do fio de LMF foram fornecidos pelo fabricante da liga. O calor específico ($C_p = 857 \frac{\text{W}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$) e as quatro temperaturas de transformação de fase ($M_f = 40^\circ\text{C}$, $M_s = 50^\circ\text{C}$, $A_s = 55^\circ\text{C}$ e $A_f = 70^\circ\text{C}$) foram obtidas por (Faria, 2010). As resistividades elétricas ($\rho_{elM} = 0.76 \mu\Omega.m$ e $\rho_{elA} = 0.82 \mu\Omega.m$) foram fornecidos pelo laboratório *Kellogg's Research*. Os comprimentos inicial e final do fio de LMF ($L_o = 230 \text{ mm}$ e $L_f = 237.39 \text{ mm}$) foram devidamente mensurados e a deformação residual encontrada foi de $\epsilon_L = 0.032$. A massa do suporte móvel ($M = 12g$) foi determinada utilizando uma balança de precisão e o coeficiente de atrito viscoso (c) foi considerado inicialmente com um valor de $c = 0.02 \frac{\text{Ns}}{\text{m}}$. A temperatura ambiente ($T_\infty = 28^\circ\text{C}$), por sua vez, foi determinada utilizando um termômetro convencional e, com base nas temperaturas de mudança fase, os coeficientes de transferência de calor ($h_h = 16.43 \frac{\text{W}}{\text{m}^2^\circ\text{C}}$ - por aquecimento e $h_c = 22.47 \frac{\text{W}}{\text{m}^2^\circ\text{C}}$ - por resfriamento) foram computados utilizando a Eq. (8).

O processo de validação do modelo do atuador de LMF (Eq. 15) foi realizado em malha aberta através de um ensaio em rampa. O sinal de comando (u) para a fonte de corrente é ilustrado na Fig. 4.

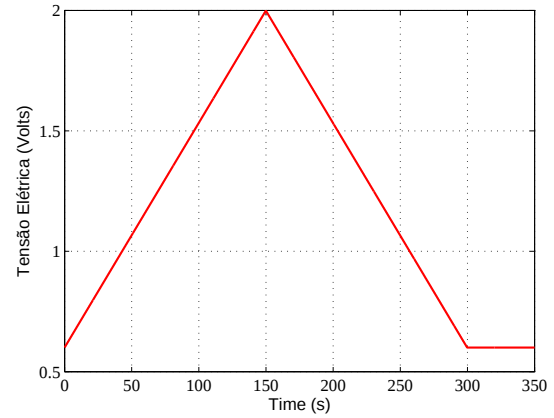


Figura 4: Sinal de entrada u .

A Figura 5 ilustra a comparação entre as curvas numérico (Eq. 15) e experimental do deslocamento do atuador utilizando os parâmetros iniciais mencionados anteriormente.

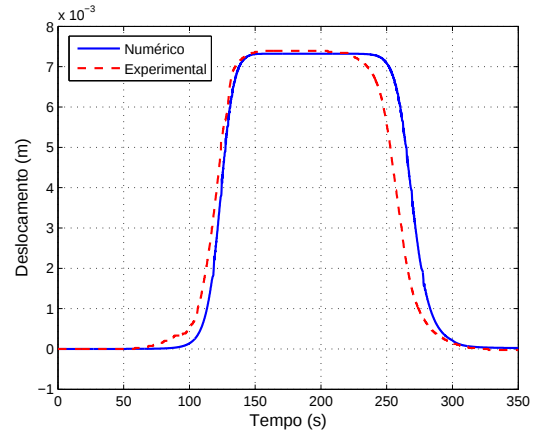


Figura 5: Deslocamento do atuador de LMF considerando os parâmetros iniciais.

Assim, para se obter um melhor resultado, os parâmetros iniciais, com exceção da densidade (ρ) e da temperatura ambiente (T_∞), foram então otimizados através do comando *fmincon* do *Matlab*®, tendo como função custo a integral ponderada pelo tempo (t) do valor absoluto do erro (ou *ITAE*-Integral of Time-weighted Absolute Error), definida como (Smith e Corripio, 1997):

$$ITAE = \int_0^\infty t|e(t)|dt \quad (17)$$

onde e é o erro entre os perfis de temperatura teórico e experimental.

A Tabela 1 mostra os valores iniciais, mínimos e máximos empregados durante o procedimento de otimização desenvolvido.

Tabela 1: Parâmetros iniciais, mínimos e máximos das variáveis a serem otimizadas.

Parâmetro	Unid.	Inicial	Mín	Máx
M_f	$^{\circ}C$	40	25	55
M_s	$^{\circ}C$	50	35	65
A_s	$^{\circ}C$	55	40	70
A_f	$^{\circ}C$	70	55	85
C_{PM}	$\frac{J}{kg.^{\circ}C}$	857	400	857
C_{PA}	$\frac{J}{kg.^{\circ}C}$	857	400	857
c	$\frac{Ns}{m}$	0.02	0.02	2
ρ_{elM}	$\mu\Omega.m$	0.76	0.46	0.96
ρ_{elA}	$\mu\Omega.m$	0.82	0.48	0.98
h_h	$\frac{W}{m^2.^{\circ}C}$	16.43	2	100
h_c	$\frac{W}{m^2.^{\circ}C}$	22.47	2	100

A Tabela 2 mostra os parâmetros finais otimizados.

Tabela 2: Parâmetros otimizados para o atuador de LMF.

Parâmetro	Unidade	Final
M_f	$^{\circ}C$	39.76
M_s	$^{\circ}C$	51.14
A_s	$^{\circ}C$	53.91
A_f	$^{\circ}C$	70.76
C_{PM}	$\frac{J}{kg.^{\circ}C}$	855.19
C_{PA}	$\frac{J}{kg.^{\circ}C}$	856.51
c	$\frac{Ns}{m}$	0.89
ρ_{elM}	$\mu\Omega.m$	0.78
ρ_{elA}	$\mu\Omega.m$	0.80
h_h	$\frac{W}{m^2.^{\circ}C}$	16.91
h_c	$\frac{W}{m^2.^{\circ}C}$	26.69

Devido aos aspectos construtivos do protótipo construído, nota-se que o coeficiente de atrito viscoso sofreu uma alteração considerável. Já os parâmetros h_c e h_d tiveram um aumento de 2 % para h_c e 18.78 % para h_d .

A Figura 6 ilustra a comparação entre as curvas numérico-experimental do deslocamento do atuador de LMF, com base nos parâmetros otimizados mostrados na Tab. 2.

Na equação (15), se a variável x for medida, a fração martensita ξ pode ser estimada experimentalmente ($\hat{\xi}$) com o deslocamento real (x) do atuador. Isso pode ser feito considerando uma aproximação quase estática para a Eq. (15), fazendo $\dot{x} = \ddot{x} = 0$, que resulta:

$$\hat{\xi} = 1 - \frac{Kx}{K_0(\epsilon_L L_f - x)} \quad (18)$$

onde $K_0 = Y_A \frac{A}{L_o}$.

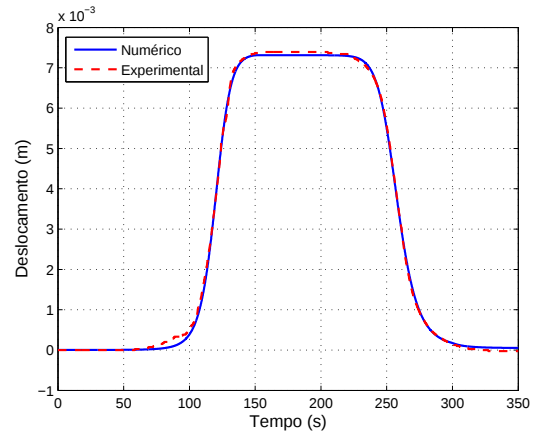


Figura 6: Deslocamento do atuador de LMF considerando os parâmetros otimizados.

O gráfico da Fig. 7 ilustra a comparação entre ξ (resultado numérico com os parâmetros otimizados) e $\hat{\xi}$ (obtida a partir do deslocamento real x).

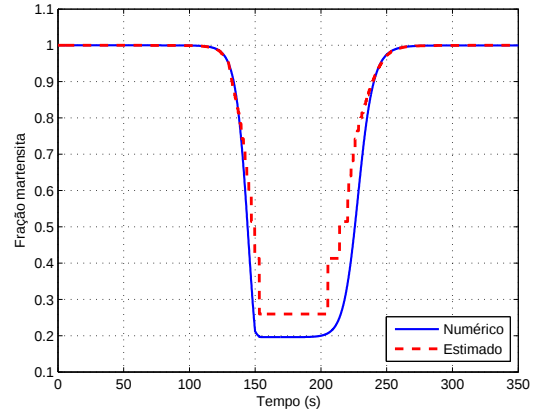


Figura 7: Fração martensita obtida numericamente (ξ) e estimada ($\hat{\xi}$) com dados experimentais.

7 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para a modelagem matemática de um atuador de liga de memória de forma (LMF) construído. O objetivo principal foi analisar o efeito de memória de forma, utilizando o modelo de (Ikuta et al., 1991) para a transformação de fase.

O efeito de mudança de fase foi experimentalmente verificada utilizando uma fonte de corrente controlável. O objetivo principal deste experimento foi validar o modelo térmico proposto, considerando principalmente a variação do calor específico (C_p) em função da fração martensita (ξ) do material.

Um teste em rampa foi realizado a fim de ajustar com dados experimentais, o modelo dinâmico proposto para o atuador de LMF construído. Os

resultados alcançados mostraram boa concordância entre os modelos teórico e experimental.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP pelo auxílio financeiro concedido.

Referências

- Abreu, G. L. C. M., Maestá, M. F., Lopes, V., DeMarqui, C., Faria, C. T. e Inman, D. J. (2014). Active angular control of a sectioned airfoil using shape memory alloys and fuzzy controller, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* **1**: 1–13.
- Ashrafioun, H., Eshraghi, M. e Elahinia, M. H. (2006). Position control of a three-link shape memory alloy actuated robot, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **17**: 381–392.
- Boyd, J. G. e Lagoudas, D. C. (1994). Constitutive model for simultaneous transformation and reorientation in shape memory alloys, *Mechanics of Phase Transformation and Shape Memory Alloys* pp. 159–177.
- Brinson, L. C. (1993). One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: Thermo-mechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **4**: 229–242.
- Elahinia, M. H. e Ahmadian, M. (2005). An enhanced sma phenomenological model: II. the experimental study, *Smart Material and Structures* **14**: 1309–1319.
- Faria, C. T. (2010). *Controle da variação do arqueamento de um aerofólio utilizando atuadores de memória de forma.*, Mestrado em engenharia mecânica, Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira.
- Faria, C. T., DeMarqui, C., Inman, D. J. e Lopes, V. (2012). Nonlinear dynamic model and simulation of morphing wing profile actuated by shape memory alloys, *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series* **3**: 21–28.
- Gil, F. J. e Planell, J. A. (1998). Shape memory alloys for medical applications, *Journal of Engineering in Medicine* **212 Part H**: 473–488.
- Holman, J. P. (1999). *Transferência de Calor*, 10 edn, Mcgraw hill, Inc.
- Ikuta, K., Tsukamoto, M. e Hirose, S. (1991). Mathematical model and experimental verification of shape memory alloy for designing micro actuator, *Proceedings of the IEEE on micro electromechanical systems, an investigation of microstructures, sensors, actuators, machines, and robots* pp. 103–108.
- Kannan, S., Giraud-Audine, C. G. e Patoor, E. (2013). Application of laguerre based adaptive predictive control to shape memory alloy (sma) actuator, *ISA Transactions* **4**: 469–479.
- Leo, D. (2007). *Engineering Analysis of Smart Material Systems*, John Wiley and Sons.
- Liang, C. e Rogers, C. A. (1991). Multi-dimensional constitutive relations of shape memory alloys, *Structural Dynamics and Materials Conference - Part I*, pp. 178–185.
- Liu, S., Huang, T. e Yen, J. (2010). Tracking control of shape-memory-alloy actuators based on self-sensing feedback and inverse hysteresis compensation, *Sensors* **10**: 112–127.
- Paiva, A. (2004). *Modelagem do comportamento termomecânico das ligas com memória de forma.*, Master's thesis, Tese (Doutorado)-Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica- PUC, Rio de Janeiro.
- Romano, R. e Tannuri, E. (2009). Modeling, control and experimental validation of a novel actuator based on shape memory alloys, *Mechatronics* **19**: 1169–1177.
- Smith, A. C. e Corripio, B. A. (1997). *Principle and practice of automatic process control*.
- Wu, M. H. e Schetky, L. M. (2000). Industrial applications for shape memory alloys, Pacific Groove, California, pp. 171–182.