

ANÁLISE TEÓRICA PARA OTIMIZAÇÃO DA FREQUÊNCIA MÁXIMA DE TRABALHO DE UM ATUADOR DE LIGA DE MEMÓRIA DE FORMA

Henrique Gabriel Borduqui

UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Departamento de Engenharia Mecânica
henriquebor@aluno.feis.unesp.br

Cássio Thomé de Faria

cassiofar@dem.feis.unesp.br

Danilo Moura Prata

danielopra@aluno.feis.unesp.br

Vicente Lopes Júnior

vicente@dem.feis.unesp.br

Resumo: Neste trabalho é apresentado uma análise teórica de um atuador com liga de memória de forma de duas posições finais, para determinar a faixa de frequência ótima para a atuação. A liga de memória de forma tem propriedades termomecânicas que realizam a função de atuador ao ser submetido a uma corrente elétrica (efeito Joule). O que limita a frequência de trabalho é o processo de resfriamento, porque ele é muito lento comparando-se com o de aquecimento. Logo, para determinar a frequência máxima de trabalho, desenvolveu-se a modelagem matemática do atuador proposto realizando o controle de uma barra, bem como a análise térmica. Os atuadores de liga de memória de forma podem substituir em aplicações específicas atuadores hidráulicos e pneumáticos, por serem mais leves e ágeis, o que é de grande importância para os projetos mecânicos.

Palavras-chave: liga de memória de forma, atuador, frequência máxima de trabalho.

1. INTRODUÇÃO

As ligas de memória de forma (SMAs) são ligas metálicas consideradas como materiais inteligentes. Estas ligas possuem propriedades termomecânicas que permitem ser facilmente deformadas em baixas temperaturas, mas quando submetidas a altas temperaturas exercem uma tensão significativa tendendo a voltar para sua forma original.

Com essas características as SMAs estão sendo usadas nas áreas médicas como sustentações de vasos tabulares como vasos sanguíneos (Duerig et. al., 1999), odontológicas, industriais e em robóticas, projetando tamanhos reduzidos de atuadores.

As ligas com memória de forma apresentam uma série de comportamentos termomecânicos particulares (Savi, 2004). Os principais fenômenos associados à estas ligas são descritos a seguir:

1.1 Transformação de Fase Devido a Variação de Temperatura.

As SMAs possuem duas fases cristalográficas estáveis em temperaturas distintas quando livre de carregamento, a martensita é estável a temperaturas T_M e a austenita a temperaturas T_A , sendo que $T_M < T_A$. Os índices M e A se referem as fases martensita e austenita respectivamente.

A Figura 1 apresenta o fenômeno de transformação de fase devida à variação de temperatura, mostrado através da curva ε - T . No ponto D temos a fase austenita estável. Diminuindo a temperatura ocorre a transição da austenita para martensita ao atingir M_s . A partir do ponto A até atingir o ponto B, o qual a martensita passa ser estável abaixo dele, é uma faixa de transição. Elevando-se a temperatura, a partir do ponto B, ao atingir o ponto C, observa-se uma transformação de fase inversa até o ponto D, fechando o ciclo.

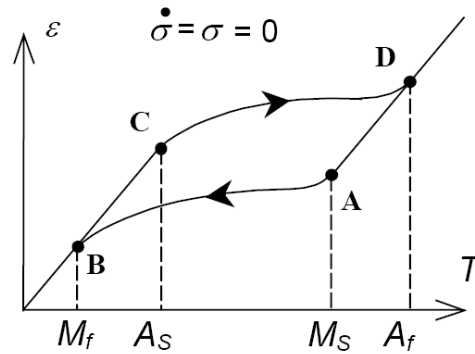


Figura 1: Transformação de fase devida à variação de temperatura.

1.2 Pseudo-elasticidade

Este fenômeno ocorre quando a liga está submetida a uma temperatura acima da temperatura de estabilização da austenita (A_f). Uma tensão crítica é aplicada no material forçando-o a passar por uma auto-acomodação e induzindo a formação de uma variante de martensita. A Figura 2 mostra a formação desta variante no ponto A. Continuando a aumentar esta tensão crítica até o limite elástico da liga, para não haver deformação plástica, chega-se ao ponto B. Quando aliviada a tensão o material experimenta uma transformação inversa da fase martensita para austenita, já que a uma temperatura maior que A_f a fase martensita é instável, mostrado pelo trecho CD.

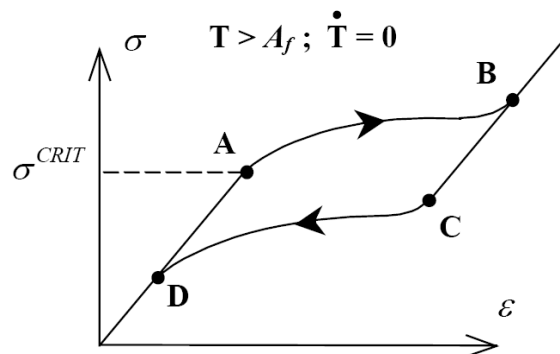


Figura 2: Propriedade pseudo-elasticidade.

1.3 Memória de Forma

A memória de forma é a capacidade do material retornar a sua forma e estrutura original. Quando isto ocorre, o material dispersa a energia (carga) acumulada (figura 3). Este conceito se confunde com a pseudoelasticidade, pois as mudanças drásticas de forma e estrutura que ocorrem nos materiais com esta característica, resultam em maiores amplitudes de deformação e subsequente retorno à forma e estrutura original. Esta propriedade, portanto, apresenta-se mais evidente nos materiais SMA que sofrem a transformação martensítica.

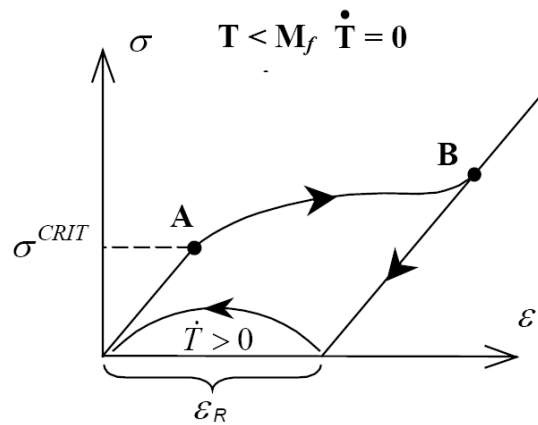


Figura 3: Propriedade efeito de memória de forma.

1.4. Efeito de Memória de Forma Reversível

O efeito de memória de forma reversível consiste na associação de uma forma para a estrutura cristalina da liga, logo, tem-se uma forma associada para cada faixa de temperatura.

Existem dois processos de treinamento para ligas com memória de forma, denominados ciclos de SME (Shape Memory Effect Cycling), o qual é baseado no processo de plastificação da martensita após o processo de reorientação, e o treinamento através de ciclos pseudoelásticos (Stress-Induced Martensite Training – SIMT), que é obtido a partir do fenômeno de pseudoelasticidade.

Visando uma análise mais precisa do comportamento destes materiais, tem-se tornado cada vez maior o interesse no desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de descrevê-lo de maneira adequada, permitindo explorar todo o seu potencial. A modelagem destas ligas possui duas abordagens distintas. A primeira, microscópica, tem um enfoque que leva em consideração aspectos metalúrgicos das ligas. A segunda abordagem, macroscópica, apresenta uma preocupação com os aspectos fenomenológicos (Paiva et. al., 2003).

O fenômeno de transformações de fase é responsável pelas propriedades das SMAs. Estas transformações são processos não-difusivos envolvendo fases sólidas que ocorrem a velocidades muito elevadas. Atribui-se a causa dessas transformações à diferença de energia livre entre as estruturas constituintes envolvidas no processo, o que induz modificações nas ligações químicas, tornando as transformações de fase de caráter essencialmente cristalográfico. De fato, existem duas possíveis fases de microconstituintes associadas às SMAs: a austenita (estável a alta temperatura) e a martensita (estável a baixa temperatura). Enquanto a austenita possui uma estrutura cúbica de corpo centrado bem ordenada que apresenta apenas uma variante, a martensita pode apresentar até vinte e quatro variantes para o caso mais geral e sua estrutura depende do tipo de transformação sofrida pelo material.

1.5 A Liga de Memória de Forma em Atuadores

Para a produção de estruturas inteligentes como atuadores, as ligas com memória de forma (SMAs) constituem uma boa alternativa para funcionarem quando se necessita de grandes forças e deformações e quando as frequências são baixas (Savi & Braga, 1993).

Os atuadores de SMAs são fáceis de fabricar, relativamente leves e capazes de produzir grandes forças ou deslocamentos com baixo consumo de energia. As ligas Ni-Ti, Ni-Al, Cu-Zn, Cu-Zn-Al, Cu-Zn-Sn, Cu-Zn-Si, Cu-Zn-Ga, Cu-Al-Ni, Cu-Au-Zn, Cu-Sn, Au-Cd, Fe-Pt, Mg-Cu, Fe-Mn-Si-Cr-Ni são algumas das chamadas SMAs (Wayman, 1980).

2. MODELO DE ATUAÇÃO PROPOSTO BASEADO EM LIGA DE MEMÓRIA DE FORMA

Neste trabalho adotamos um tipo de atuador convencional simples que trabalha com uma mola de SMA, com o fenômeno do efeito de memória de forma, contrabalaceando com uma mola de aço padrão.

O sistema de funcionamento ocorre quando a SMA é submetida a uma corrente elétrica (efeito Joule) e a mola de SMA volta à sua forma original (esticada). Este processo é similar a um coeficiente em função da temperatura, $K_{SMA}(T)$, que fica superior à constante da mola convencional (K_{mola}). A força gerada pela mola de SMA é maior e empurra o pistão comprimindo a mola convencional. Portanto, quanto maior a temperatura fornecida para mola de SMA, maior será o K_{SMA} . Quando cessar a corrente na SMA ocorrerá um resfriamento natural da liga e por consequência o K_{SMA} ficará menor do que o K_{mola} . A Figura 4 mostra a mola convencional empurrando a mola de SMA que se encontra na fase martensita sendo facilmente deformada.

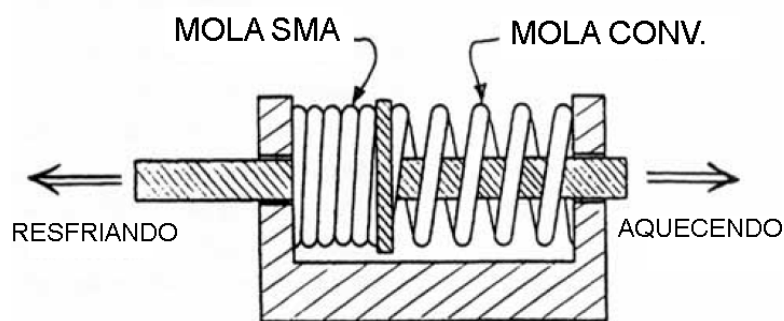


Figura 4: Projeto do atuador

2.1 Modelagem do Atuador

Para fazer a modelagem do atuador se adotou a massa do pistão M e que não há atrito. A Figura 5 mostra a análise das forças atuando no sistema (atuador).

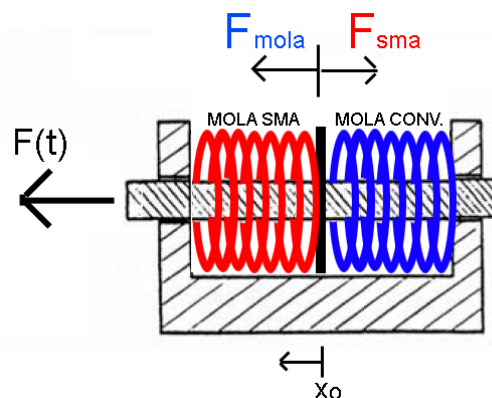


Figura 5: Análise das forças no sistema de atuação.

Sendo que:

$$F_{mola} = K_{mola} x \quad (1)$$

$$F_{SMA} = K_{SMA}(t) x \quad (2)$$

Fazendo, $\Sigma F_x = F(t)$ o modelo da equação do sistema é

$$F(t) = M\ddot{x} + K_{\text{mola}} x - K_{\text{SMA}}(t) x \quad (3)$$

2.2 Aplicação do atuador para o cálculo da faixa de frequência

Considerando uma barra engastada com propriedades de um material linear e isotrópico com módulo de Young igual a E , momento de inércia I , submetida a um excitador que gera uma força $F(t)$ a uma distância “ a ” da extremidade engastada. O atuador SMA é posicionado na outra extremidade, conforme a Figura 6.

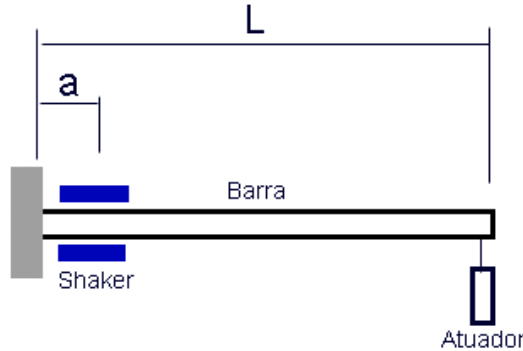


Figura 6: Sistema barra-atuador.

Para calcular a deflexão máxima, $y(t)$, que a barra pode gerar a uma distância igual a L , devido a força $F(t)$ na posição a , conforme a Figura 7, temos pelo método de funções singulares:

$$y(t) = \frac{F(t)}{EI} \left(-\frac{aL^2}{2} + \frac{L^3}{6} - \frac{(L-a)^3}{6} \right) \quad (4)$$

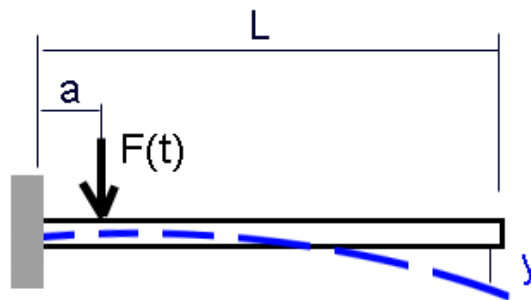


Figura 7: Deflexão da barra.

Fazendo $y(t) = x(t)$ e substituindo então, a Equação 4 em 3 temos:

$$F(t) = \frac{1}{EI} \left(-\frac{aL^2}{2} + \frac{L^3}{6} - \frac{(L-a)^3}{6} \right) \left(M \frac{d^2 F(t)}{dt^2} + K_{\text{mola}} F(t) - K_{\text{SMA}}(t) F(t) \right) \quad (5)$$

Para realizar o controle da estrutura, que é regida pela Equação 5, deve-se alterar a constante elástica da liga de memória de forma, a qual é definida por:

$$K_{SMA}(t) = [(1 - \xi(t))E_A] \quad (6)$$

A variável E_A é o módulo de elasticidade da liga na fase austenística; $\xi(t)$ corresponde a fração martensítica da SMA expressa por:

$$\xi(t) = \frac{1 - \xi_A}{1 + \exp\left[\frac{6,2}{M_f - M_s} \left(T(t) - \frac{M_s + M_f}{2}\right)\right]} \quad (\text{Resfriamento}) \quad (7)$$

onde ξ_A é a fração austenística no início do processo; M_s e M_f são as temperaturas de início e fim da formação de martensita, respectivamente.

Dentro da aplicação das ligas de memória de forma em atuadores, o principal problema é o ciclo de resfriamento que, por normalmente ser demorado, aumenta o tempo de resposta dos atuadores, quando são submetidos a este ciclo. Portanto, o principal limitador da faixa de frequência em que estes atuadores podem operar é este processo. Aplicando-se, então, uma análise térmica do resfriamento sobre a Equação 7 e, conseqüentemente, sobre a Equação 5, encontra-se o tempo de resposta do atuador para determinada excitação.

A análise térmica do processo de resfriamento é dada para o caso global convectivo como (Incropera, 2003):

$$\frac{T(t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp\left(\frac{-2ht}{\rho cr}\right) \quad (8)$$

Onde T_i é a temperatura inicial da liga, T a temperatura do fluido em convecção, c o calor específico do material, r o raio da liga para fios circulares, ρ a densidade da SMA, e h o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Considerando uma força de excitação senoidal, as propriedades descritas na Tabela 1, e as formulações apresentadas nas Equações 5 a 8, relaciona-se a frequência de aplicação da força com o tempo de resposta do atuador de SMA para o caso do resfriamento (Figura 8).

Tabela 1: Propriedades típicas da liga aplicadas à simulação numérica

Variável	Valor
h	7 W/m ² °C/m
M _s	66°C
M _f	34°C
c	837 J/Kg.K
ξ _A	0
ρ	6480kg/m ³
r	0,00155 m
T _i	80°C
T _∞	25°C
L	0,30 m
a	0,05 m
M	0,030 kg
E	210 GPa
I	2x10 ⁻¹¹ m ⁴
K _{mola}	5 N/m
E _A	0,508 GPa

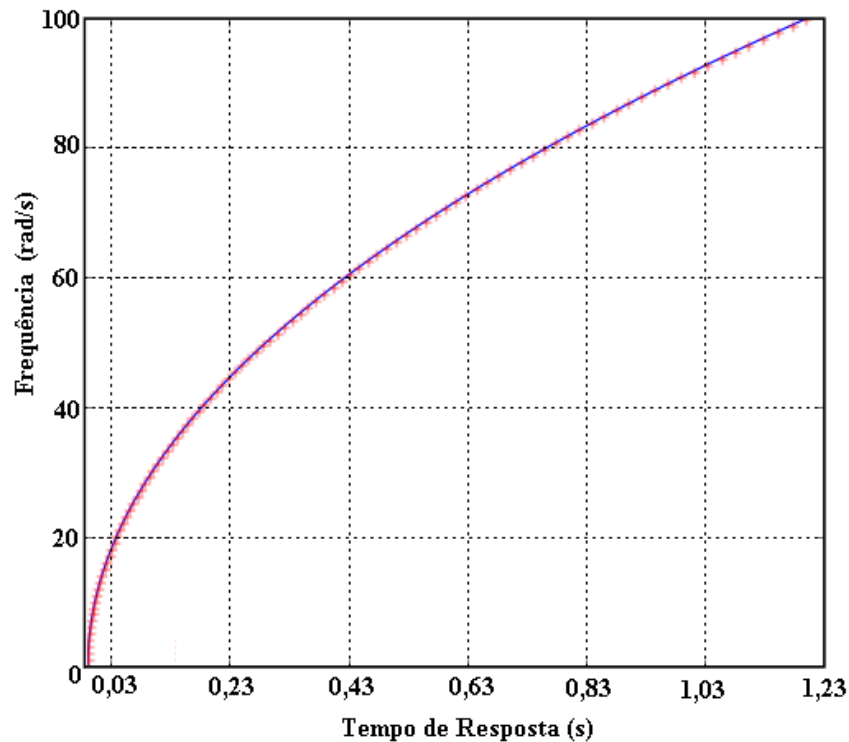


Figura 8: Gráfico de relação entre a frequência e o tempo de resposta de atuadores de SMA para o ciclo de resfriamento.

3. CONCLUSÃO

Para análise de atuadores que funcionam com o princípio de memória de forma, um tempo de resposta instantânea pode ser aproximado pelo período onde a inclinação da curva é mais acentuada. Visto isso ao analisarmos a Figura 8 conclui-se que o atuador especificado pelas propriedades da Tabela 1 apresenta uma faixa de trabalho adequada entre 0 e 18 rad/s. Para frequência acima da máxima indicada a lentidão do processo de resfriamento destes atuadores passa a influenciar na performance dos mesmos.

Para interferir no processo de resfriamento de modo a ampliar a faixa de frequência de atuação de atuadores desta natureza, o mais indicado é intervir no coeficiente de transferência de calor por convecção, o qual é inversamente proporcional ao tempo de resposta.

O estudo apresentado neste trabalho permite especificar um atuador adequado para uma determinada aplicação, bem como a modelagem proposta pode ser usada de forma abrangente nos problemas que envolvem atuadores baseados com liga de memória de forma.

4. REFERÊNCIAS

- Duerig, T., Pelton, A. & Stöckel, D., 1999, “An overview of Nitinol Medical Applications”, *Materials Science and Engineering A*, v.273-275, pp.149-160.
- Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.; “Fundamentos de Transferência de Calor e Massa”, 5ª edição, Rio de Janeiro, 2003. 698 p.
- Savi, M. A. & Braga, A. M. B. (1993), “Chaotic Vibrations of an Oscillator with Shape Memory”, *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas - RBCM*, v.XV, n.1, pp.1-20.
- Savi, M. A. ; Paiva, A. ; Pacheco, P. M. C. L. . Modelos Constitutivos para Ligas com Memória de Forma. In: J.M. Balthazar; G.N. Silva; M. Tsuchida; M. Boaventura; L.S. Goes; J.R.S. Silva; (Org.). *Anais do DINCON 2003; Série Arquimedes*. São José dos Campos: , 2004, v. 2, p. -.
- Wayman, C. M. (1980), “Some Applications of Shape Memory Alloys”, *Journal of Metals*, June, pp.129-137.

THEORETICAL ANALISYS OF THE MAXIMUM WORK FREQUENCY IN A SHAPE MEMORY ALLOY ACTUATOR

Henrique Gabriel Borduqui

UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Departamento de Engenharia Mecânica
henriquebor@aluno.feis.unesp.br

Cássio Thomé de Faria

cassiofar@dem.feis.unesp.br

Danilo Moura Prata

daniopra@aluno.feis.unesp.br

Vicente Lopes Júnior

vicente@dem.feis.unesp.br

***Abstract:** In this paper is presented a theoretical analysis of a shape memory alloy actuator, to determine the maximum work frequency where this dispositive presents a good response time. Shape memory alloy has several thermo-mechanical properties, and is commonly used to build fast and silence actuators. What limit the work frequency is the natural convection cooling processes of this material, because it is too slow in comparison with the heating one (done by Joule Effect), so to determine the maximum work frequency an mathematical modeling of the proposed actuator controlling a beam was developed. Shape memory alloy actuators can replace hydraulic and pneumatic actuator for being lighter, and faster, which is very important in mechanical projects.*

***Keywords:** shape memory alloy, actuator, maximum work frequency.*