

## ANÁLISE TÉRMICA DE UM NOVO MODELO DE ATUADOR UTILIZANDO LIGA DE MEMÓRIA DE FORMA

### **Cássio Thomé de Faria**

UNESP – FEIS – Departamento de Engenharia Mecânica – Av. Brasil, Centro, nº56, Ilha Solteira-SP  
cassiofar@dem.feis.unesp.br

### **Henrique Gabriel Borduqui**

henriquebor@aluno.feis.unesp.br

### **Danilo Moura Prata**

danielopra@aluno.feis.unesp.br

### **André Luiz Seixlack**

andre@dem.feis.unesp.br

### **Vicente Lopes Júnior**

vicente@dem.feis.unesp.br

**Resumo:** *Propõe-se neste trabalho um modelo de resfriamento para atuadores à base de liga de memória de forma (SMA), na qual um fio da liga é imerso em uma solução polimérica que apresenta a propriedade de aglomerar-se em torno de um fio quando uma corrente elétrica circula pelo mesmo. Esta solução acelera o processo de resfriamento, pois aumenta o coeficiente de transferência de calor por convecção e ainda mantém o fio termicamente isolado quando ele está sendo aquecido. O propósito deste trabalho é apresentar um estudo da transferência de calor nesse novo modelo de resfriamento dos atuadores de liga de memória de forma baseando-se no método de análise global. A aplicação deste novo modelo de resfriamento com a análise térmica apresentada, permite uma maior aplicação das ligas de memória de forma, pois torna ainda mais ágil e eficientes os atuadores que utilizam este princípio.*

**Palavras-chave:** *liga de memória de forma, atuador, análise térmica.*

## 1. INTRODUÇÃO

Há vários tipos de materiais inteligentes usados para aplicações estruturais, como materiais piezelétricos, magnetoresistivos, ligas de memória de forma (SMA), fluidos eletroreológicos, e outros. O papel fundamental desempenhado por esses materiais é a capacidade de sofrer alterações controláveis de suas características físicas, mecânicas, elétricas, ópticas, e outras. Esta capacidade de adaptação tem possibilitado a proposição de tipos inovadores de sensores e atuadores (Carvalho, 2005).

As SMAs são ligas metálicas capazes de recuperar a geometria original, ou de desenvolver consideráveis forças de restituição ao se restringir sua recuperação, por meio da imposição de um campo de temperatura e/ou de tensão, devido a transformações de fase induzidas no material. As ligas com memória de forma apresentam uma série de comportamentos termomecânicos particulares conforme mostrado por Savi (2004). Os principais fenômenos associados à estas ligas são:

### 1.1. Pseudoelasticidade

A pseudoelasticidade é caracterizada pelo comportamento atípico da liga em relação ao clássico gráfico de carga/deformação (vide Fig. 1). O fio pseudoelástico apresenta duas fases estruturais que determinam um regime elástico, um regime plástico, um outro regime elástico e então atinge outro regime plástico. Enquanto a liga está no regime elástico, comporta-se de maneira convencional. Esta fase é caracterizada por uma estrutura austenítica. Quando o seu limite pseudoelástico é ultrapassado, a liga sofre deformação maior, entretanto com um acúmulo de carga quase constante, formando um “platô” no gráfico carga/deformação. Nesta fase a estrutura torna-se martensítica, ditando este comportamento atípico. Como toda liga pseudoelástica apresenta memória de forma, na desativação o fio é capaz de retornar tanto à forma como à estrutura original.

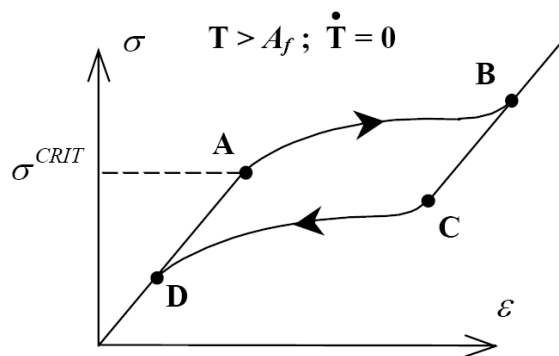


Figura 1: Gráfico tensão/deformação para a liga na condição pseudoelástica.

### 1.2. Transformação de fase devido à variação de temperatura

Para o fenômeno de transformação de fase devida à variação de temperatura, considere uma amostra de SMA a uma temperatura elevada e livre de tensões. O material apresenta uma microestrutura austenítica, com o decréscimo da temperatura, a estrutura cristalina experimenta uma transformação de fase martensítica. Este processo inicia-se quando a temperatura é igual a temperatura de início de nucleação da martensita ( $M_S$ ) e se desenvolve até que seja atingida a temperatura de final de nucleação da martensita ( $M_F$ ), abaixo da qual a martensita é estável.

Elevando-se a temperatura, ao atingir a temperatura de início de nucleação da austenita ( $A_S$ ), observa-se uma transformação de fase inversa, martensita para austenita, que persiste até que a temperatura final de nucleação da austenita ( $A_F$ ) seja alcançada.

Este fenômeno pressupõe três regiões distintas. Duas delas relacionadas aos trechos lineares que correspondem à expansão térmica das fases austenítica e martensítica e uma região onde há um laço de histerese relacionada aos trechos de transformação de fase. A área compreendida por este laço representa a energia dissipada durante o processo.

### 1.3. Efeito de memória de forma

A memória de forma é a capacidade do fio retornar à sua forma e estrutura originais. Quando isto ocorre, o fio dispersa a energia (carga) acumulada. Este conceito confunde-se com a pseudoelasticidade, pois as mudanças drásticas de forma e estrutura que ocorrem nos fios com esta característica, resultam em maiores amplitudes de deformação e subsequente retorno à forma e estrutura originais (Fig. 2). Esta propriedade, portanto, apresenta-se mais evidente nos fios SMA que sofrem a transformação martensítica.

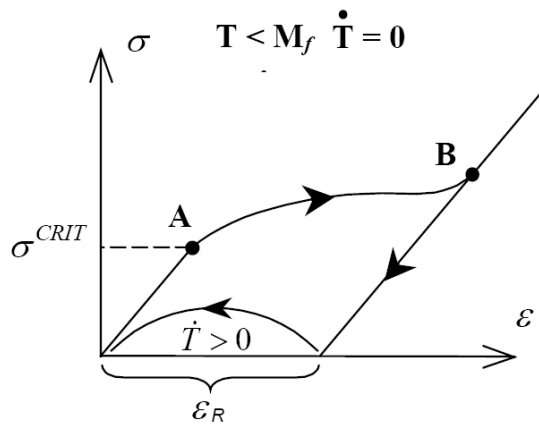


Figura 2: Diagrama ilustrativo do comportamento micro estrutural da liga de SMA com efeito de memória de forma.

#### 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. Com isso 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*). Um deles é baseado no processo de plastificação da martensita após o processo de reorientação e o outro é 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-los de maneira adequada, permitindo explorar todos os seus potenciais. 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.

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.

Estes materiais vêm sendo utilizados nas mais diversas aplicações, variando desde a indústria aeroespacial até a biomédica, passando pela robótica. Dentre estas, vale citar inúmeros dispositivos termo-ativados (Wayman, 1980) como válvulas pneumáticas para o controle de fluxo, dispositivos que exploram a pseudoelasticidade como armações de óculos e muitos outros. Na ortodontia, o emprego de aparelhos com memória de forma trouxe resultados muito satisfatórios, difundindo bastante o uso das SMAs. Na indústria robótica tem se dedicado a utilizar fibras de SMA para reproduzir o movimento contínuo dos músculos humanos (Duerig *et. al*, 1999) e na área biomédica, estes materiais são aplicados na construção de pequenos tubos que são colocados dentro dos vasos sanguíneos com a função de reforçar as suas paredes internas.

Para as aplicações deste material em atuadores, um dos principais problemas é justamente o resfriamento da liga de forma ágil (Silva, 2005), para melhorar a resposta dos atuadores, uma vez que na etapa de aquecimento ele apresenta uma resposta excelente. Com objetivo de melhorar a aplicação destes tipos de atuadores, propõe-se neste trabalho um novo modelo de resfriamento, ficando a cargo desta publicação uma análise térmica mais apurada deste modelo.

## 2. MODELO DE ATUADOR PROPOSTO

Uma vez que o aquecimento por efeito Joule é rápido, o processo de resfriamento dos atuadores à base de liga de memória de forma é muito lento, pois depende apenas da convecção natural em torno do fio. Para solucionar tal dificuldade propõe-se um novo modelo de resfriamento para os atuadores, o qual utiliza um fluido ao redor da liga com maior condutividade térmica e que forneça o aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção. Tal condição por si só não apresenta nenhuma inovação, porém para manter o processo de aquecimento ainda mais eficiente, principalmente no que diz respeito à agilidade, este novo fluido será composto de uma solução polimérica para que durante o processo de aquecimento o polímero se aglomere em torno da liga.

O polímero em questão tem características especiais, pois é carregado eletricamente, fato este que permite, devido à corrente elétrica que circula na liga, a deposição junto à superfície da liga (vide Fig. 3). Além disso, esse polímero ainda apresenta um baixo coeficiente de transferência de calor por condução, para manter a agilidade do processo de aquecimento do fio.

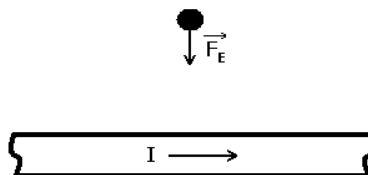


Figura 3: Esquema de atração do polímero por meio da força elétrica quando se circula uma corrente elétrica.

Em síntese, o novo modelo de resfriamento consiste na liga mergulhada em uma solução polimérica e quando circula na liga uma corrente elétrica o polímero a isola (vide Fig. 4). Na etapa de resfriamento da liga o alto coeficiente de transferência de calor por convecção da solução acelera o processo (vide Fig. 5). A modelagem matemática despreza o período transiente no qual o polímero se deposita e se afasta do fio.

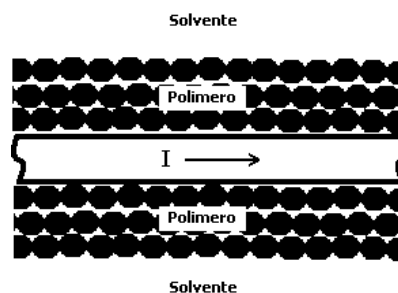


Figura 4: Condição de isolamento térmico do fio com o polímero atraído eletricamente.

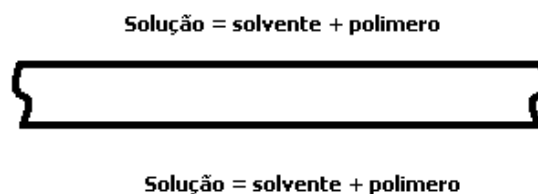


Figura 5: Período de resfriamento da liga.

### 3. ANÁLISE TÉRMICA

Para compreender os efeitos dessa nova aplicação, neste trabalho desenvolve-se uma análise térmica do sistema. Para que o atuador opere de forma correta, deve haver um modelo que forneça a temperatura da liga para um dado tempo de aplicação de uma determinada corrente, pois só assim a força aplicada pela liga será conhecida.

Considerou-se então para o estudo um fio infinito mergulhado na solução polimérica, obtendo, com isso, uma simetria radial e tornando o problema unidimensional (em coordenadas polares), com regime transiente. Devido à mudança de fase em razão da variação temperatura, a geração de energia no interior do fio não é uniforme, sendo então função da temperatura.

Considerando alguns parâmetros conhecidos (Tabela 1), desenvolveu-se um programa em PYTHON para análise do comportamento do numero de Biot, definido pela Equação 1, indicando, conforme pode ser observado pela Fig. 6, que o estudo do problema global é muito mais interessante, pois apresenta uma faixa de ação mais utilizada durante a aplicação deste tipo de problema.

$$Bi = \frac{hD}{4k_{SMA}} \quad (1)$$

onde  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção,  $D$  o diâmetro do fio, e  $k_{SMA}$  o coeficiente de condutibilidade térmica da liga de memória de forma.

Tabela 1: Valores aplicados no programa desenvolvido em PYTHON para avaliar a influência do numero de Biot (Incropera, 2003).

Variável	Valor	Unidade
$g$	9,8	m/s <sup>2</sup>
$T_{\infty}$	300	K
$T_s$	380	K
$k_{SMA}$	18	W/ m.K
$k_{AR}$	0,0313	W/ m.K
$\nu$	$22,8 \times 10^{-6}$	m <sup>2</sup> /s
$\alpha$	$32,8 \times 10^{-6}$	m <sup>2</sup> /s
$Pr$	0.697	-
$\beta$	$2,725 \times 10^{-3}$	K <sup>-1</sup>

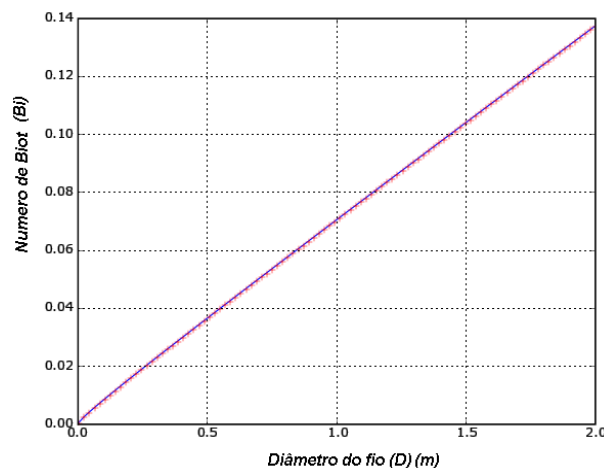


Figura 6: Influência do diâmetro do fio no numero de Biot para o caso de convecção natural do ar em torno de um fio.

Dividiu-se o domínio de análise em dois ciclos; o de resfriamento e o de aquecimento.

### 3.1. Ciclo de Resfriamento

Para a análise térmica durante o ciclo de resfriamento considera-se o método de análise global. A transferência de calor entre o fio e o fluido ocorre apenas por convecção. O fio está a uma temperatura inicial  $T_i$ . Desprezando a distribuição de temperatura no interior do fio, sua temperatura em função do tempo é dada por,

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

onde  $T_\infty$  é a temperatura do fluido ao redor do fio,  $\rho$  a densidade da liga,  $c$  é o calor específico da liga e  $D$  o diâmetro do fio.

O coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h$ ) é determinado pela correlação de Churchill e Chu (1975), apêndice Icropera e DeWitt (2003) dada por,

$$N_{ud} = \frac{Dh}{k_{AR}} = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 R_{aD}^{1/6}}{\left[1 + (0,559 / P_r)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3)$$

$$R_{aD} = \frac{g\beta(T_i - T_\infty)D^3}{\nu\alpha} \quad (4)$$

onde  $N_{ud}$  e  $R_{aD}$  correspondem respectivamente ao número de Nusselt e de Rayleigh respectivamente. A variável  $g$  representa a aceleração da gravidade,  $\beta$  o coeficiente volumétrico de expansão térmica,  $\nu$  a viscosidade cinemática e  $\alpha$  a difusividade térmica, estes valores são tabelados para cada fluido.

### 3.2. Ciclo de Aquecimento

Durante o ciclo de aquecimento do fio a geração de energia é função da temperatura uma vez que a microestrutura cristalina do material do fio muda com a temperatura, alterando a sua resistência elétrica global. Dessa forma, é assumido o seguinte modelo que descreve a fração volumétrica de martensita para uma temperatura  $T$ , durante o processo de aquecimento do fio (Romano, 2007):

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_M}{1 + \exp\left[\frac{6,2}{A_f - A_s} \left(T - \frac{A_s + A_f}{2}\right)\right]} \quad (5)$$

na qual  $\varepsilon$  é a fração martensítica,  $\varepsilon_M$  é a fração de martensita no início do processo,  $A_f$  é a temperatura acima da qual fase austenítica é estável,  $A_s$  é a temperatura de início de nucleação da austenita e  $T$  é a temperatura da liga.

Assim a energia gerada por efeito Joule no fio é descrita pela seguinte expressão, sendo este modelo uma primeira aproximação:

$$q = I^2 [R_M \varepsilon + R_A (1 - \varepsilon)] \quad (6)$$

onde  $I$  é a corrente aplicada,  $R_M$  e  $R_A$  são, respectivamente, as resistências da liga na fase martensítica e austenítica. O sistema térmico analisado pode ser observado na Fig. 7.

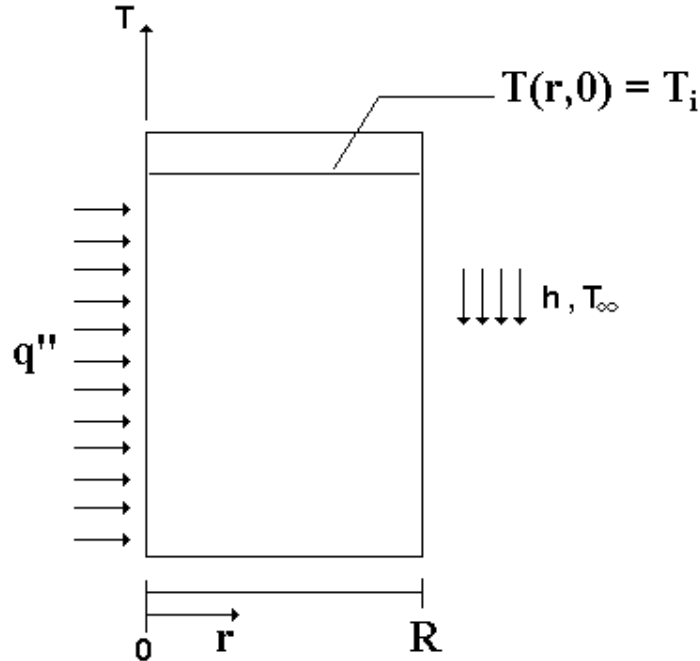


Figura 7: Modelo térmico para o problema de aquecimento.

A equação da condução de calor unidimensional em coordenadas cilíndricas no regime transiente é dada por,

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (7)$$

onde  $T = T(r,t)$  é a temperatura da camada de polímero para cada instante e para cada posição dentro da camada.

A condição inicial e as condições de contorno e para solucionar o problema são, respectivamente, dadas por,

$$T(r,0) = T_i \quad (8)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = q'' \quad (9)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h [T(R,t) - T_\infty] \quad (10)$$

nas quais,  $q''$  é definido pela Eq. 5;  $R$  é o comprimento da camada de polímero ao redor do fio;  $T_i$  é a temperatura inicial do sistema;  $T_\infty$  é a temperatura do solvente; e  $k$  é o coeficiente de condutibilidade térmica do polímero.

Assim a distribuição temperatura no polímero pode ser encontrada resolvendo-se a Eq. 7, sujeita às condições (8) a (10) usando-se o método de separação de variáveis ou um método numérico, tal como, o método de volumes finitos.

A temperatura que precisa ser conhecida é aquela da posição  $r=0$ , pois se trata do local onde o fio de SMA está.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados modelos de resfriamento e aquecimento para atuadores a base de liga de memória de forma. Durante o aquecimento o fio de SMA é isolado com uma camada de polímero, acelerando assim o ciclo de aquecimento. O ciclo de resfriamento também é acelerado, em razão do aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção causado pela dispersão do polímero. Esta alteração reduz o tempo de resposta dos atuadores, aumentando o campo de aplicação destes tipos de atuadores.

Com o modelo térmico apresentado, espera-se uma melhor precisão das estruturas de controle que utilizam atuadores deste tipo.

Nas condições estudadas, para que permaneça válida a hipótese de análise térmica global, o número de Biot deve permanecer inferior a 0,1. Pelas condições estudadas isto ocorre enquanto o diâmetro do fio for inferior a 1,44 m, tamanho este muito elevado, logo este tipo de análise pode ser amplamente utilizada para o ciclo de resfriamento. Em muitos atuadores, o diâmetro do fio de SMA aplicado corresponde a um centésimo do valor encontrado para o qual a análise global é válida. Logo a modelagem térmica proposta torna-se importante para o desenvolvimento dos modelos de controle de estruturas utilizando estes atuadores.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a bolsa do programa PET/Sesu, e ao grupo GMSINT, sem os quais tornaria inviável a realização deste trabalho.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Carvalho, Ricardo. Controle Ativo de Vibrações em estruturas espaciais tipo treliças usando controladores IMSC. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.
- Duerig, T., Pelton, A. & Stöckel, D., “An overview of Nitinol Medical Applications”, *Materials Science and Engineering A*, v.273-275, pp.149-160, 1999.
- Icropera, F. P.; DeWitt, D. P.; “Fundamentos de Transferência de Calor e Massa”, 5ª edição, Rio de Janeiro, 2003. 698 p.
- Romano, R.; Tannuri, E. A.; “Modeling, Control and Experimental Validation of a Novel Actuator Based on Shape Memory Alloys”. XII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics (DINAME 2007), Ilhabela, SP, Brazil, 2007.
- Savi, M. A., “Modelagem do Comportamento Termomecânico das Ligas com Memória de Forma”. In: 3.º Congresso Temático de Dinâmica, Controle e Aplicações - 3.º DINCON, Ilha Solteira, June, 2004.
- Silva, E. P. “Aplicação de ligas com memória de forma em estruturas adaptativas”. [personal message]. Message received by <dasilva@unb.br> , 20 out. 2005.
- Wayman, C. M. (1980), “Some Applications of Shape Memory Alloys”, *Journal of Metals*, June, pp.129-137.



## **THERMAL ANALYSES OF A NEW ACTUATION MODEL BASED ON SHAPE MEMORY ALLOY**

**Cássio Thomé de Faria**

UNESP – FEIS – Departamento de Engenharia Mecânica – Av. Brasil, Centro, n°56, Ilha Solteira-SP  
cassiofar@dem.feis.unesp.br

**Henrique Gabriel Borduqui**

henriquebor@aluno.feis.unesp.br

**Danilo Moura Prata**

daniopra@aluno.feis.unesp.br

**André Luiz Seixlack**

andre@dem.feis.unesp.br

**Vicente Lopes Júnior**

vicente@dem.feis.unesp.br

***Abstract:** Is proposed a new cooling model for shape memory alloy (SMA) actuators, where a wire of the alloy is submersed in a polymeric solution, which has the property to agglomerate in the wire when an electric current goes through. This solution accelerates the cooling process, because it increases the convection heat transfer coefficient and keeps the wire isolated in the heating process. The main purpose of this paper is to present a thermal analyses of this new cooling model in the shape memory alloy actuators, based in the global analyses of the temperature in the wire. The application of this new method, together with the thermal analyses allows a greater application field for this kind of actuator, by making this kind of actuator faster and more efficient.*

***Keywords:** Shape memory alloy, actuator, thermal analyses.*