

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UMA GARRA ROBÓTICA ACIONADA POR ATUADORES COM MEMÓRIA DE FORMA

Lucas Puttini

Edson Paulo da Silva

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro – Asa Norte
70910-900 – Brasília, DF, Brasil.
E-mail: dasilva@unb.br

Resumo. Garras robóticas são construídas para executar tarefas específicas numa faixa bem definida de tamanho de objetos. Garras mais versáteis podem ser desenvolvidas por meio de sistemas auxiliares para se obter maior flexibilidade de tamanho de objetos. Para esses sistemas auxiliares a velocidade e a eficiência não são fatores de maior importância, portanto as ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys*) se apresentam como uma solução promissora. O ponto de partida deste trabalho foi uma proposta de aplicação de SMA para construção de um sistema auxiliar numa garra robótica disponível na literatura. A força exercida sobre o objeto é realizada por um cilindro pneumático, e o sistema auxiliar é usado para pré-ajustar a faixa de tamanho de objetos a serem manipulados, por meio de aquecimento e resfriamento de atuadores com memória de forma. O presente trabalho foca a simulação do comportamento dinâmico dessa garra. Implementou-se então um sistema de controle de malha fechada no qual o comportamento dos atuadores é descrito por um modelo para SMA disponível na literatura. Alguns experimentos básicos com controladores PID foram realizados e os resultados obtidos ilustram a viabilidade da garra proposta, e o potencial das SMA para o desenvolvimento de tal tipo de aplicação.

Palavras-chave: atuadores com memória de forma, atuadores avançados, garras robóticas.

1. INTRODUÇÃO

O comportamento termomecânico das ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys – SMA*) como NiTi, NiTiCu e CuZnAl entre outras, apresenta uma forte dependência da temperatura. Esta dependência está associada ao fato de que, em função da temperatura, o material assume uma estrutura cristalina diferente (Delaey et al, 1974; Krishnan et al, 1974). No resfriamento, a formação de martensita inicia e termina em *Ms* (*Martensite start*) e *Mf* (*Martensite finish*) respectivamente. A temperaturas abaixo de *Mf*, num estado livre de tensões, o material se encontra numa fase completamente martensítica induzida termicamente, que é caracterizada por uma estrutura formada por variantes com diferentes orientações cristalográficas (Delaey et al, 1974; Krishnan et al, 1974). As interfaces entre as fronteiras destas variantes movem-se facilmente entre si, motivo pelo qual estas ligas podem ser deformadas com relativa facilidade no estado martensítico. No aquecimento, a transformação de martensita para austenita se inicia em *As* (*Austenite start*) e termina em *Af* (*Austenite finish*).

A nível macroscópico o comportamento termomecânico destas fases leva ao surgimento de três fenômenos: quasiplasticidade, pseudoelastичidade e efeito memória de forma. Abaixo de *Mf* estes materiais se encontram numa fase completamente martensítica, e se forem submetidas a níveis de

tensão suficientemente altos, observar-se-á, num diagrama Tensão-Deformação, após um comportamento inicialmente elástico, uma deformação a um nível de carga P_{crit1} praticamente constante. Após uma deformação relativamente grande, também característica de cada liga, o material volta a se comportar elasticamente. Após o descarregamento tais ligas mantêm a configuração deformada. Este comportamento é denominado quasiplasticidade. Se o material for aquecido acima de A_f ele muda de fase retornando à configuração previamente definida. Com o resfriamento livre de tensão o corpo muda novamente de fase, mas macroscopicamente mantém a configuração pré-estabelecida. Esta extraordinária recuperação de deformação quasiplástica é denominada efeito memória de forma (*Shape Memory Effect – SME*).

Se a estrutura austenítica for submetida a um determinado nível de tensão P_{crit2} , também característico da liga e função da temperatura, observar-se-á novamente uma enorme deformação a um nível de tensão P_{crit2} praticamente constante, após um comportamento inicialmente elástico. Com a retirada da carga o material retorna à configuração original, porém a um nível de tensão mais baixo e percorrendo uma histerese. Este comportamento é denominado pseudoelasticidade e está associada uma transformação de fase martensítica induzida por tensão (Delaey et al, 1974; Krishnan et al, 1974). Tanto na quasiplasticidade quanto na pseudoelasticidade observam-se deformações recuperáveis de até 10% em certas ligas (Wayman et al, 1990).

Estudos apresentados por Ikuta (1990) e Mavroidis (2002) comparam a razão potência/peso versus peso de vários atuadores convencionais como motores DC, atuadores hidráulicos e pneumáticos a atuadores baseados em SMA. Tais estudos mostram que atuadores hidráulicos podem exercer grandes forças, mas o peso também é grande. Motores DC revelam-se o pior dos atuadores considerados neste estudo, pois apresentam grande peso e baixa razão potência/peso. Os atuadores com memória de forma por outro lado apresentam relação potência/peso tão alta quanto os atuadores hidráulicos, mas são, entretanto, muito mais leves.

Devido às grandes deformações recuperáveis, grandes cargas e grandes relações potência/peso apresentadas pelas SMA, elas estão pré-destinadas a desempenhar um papel muito importante no desenvolvimento de atuadores avançados. Hesselbach e Stork (1994) sugerem a aplicação de atuadores com memória de forma para o desenvolvimento um sistema auxiliar de uma garra para ajuste de dimensões de objetos manipuláveis. Tal sistema auxiliar é baseado em atuadores de SMA.

A partir da proposta de Hesselbach e Stork (1994) o presente trabalho tem como objetivo simular o comportamento dinâmico desta garra. Primeiramente apresenta-se a garra proposta e definem-se suas características dimensionais. Para modelar o comportamento dos atuadores com memória de forma utiliza-se o modelo proposto por Brison (1993). Implementa-se então um sistema de controle de posição para a garra e simula-se o seu comportamento dinâmico. Os resultados obtidos mostram, qualitativamente, a viabilidade da proposta, e ilustram a potencialidade das SMA para o desenvolvimento de tal tipo de aplicação.

2. DESCRIÇÃO DA GARRA

A garra proposta por Hesselbach e Stork (1994) é mostrada na Figura (1). Trata-se de uma garra com extensão variável, na qual a ação principal é feita por um cilindro pneumático. Um par de atuadores de SMA é responsável pelo ajuste do mecanismo auxiliar da garra. O ajuste é controlado através do aquecimento por corrente elétrica dos fios de SMA, e tem por finalidade permitir uma maior flexibilidade da garra. O detalhe na Figura (1) mostra o mecanismo de acoplamento responsável por manter a estrutura fixa tão logo o posicionamento desejado para o sistema auxiliar seja atingido. Diferentemente das garras tradicionais a garra proposta pode ter sua estrutura modificada de acordo com o tamanho do objeto a ser manipulado. No detalhe da Figura (1) vê-se também a mola de torção posicionada em oposição ao fio de SMA. Sua função é manter o fio sob tensão e realizar o movimento em sentido contrário à contração do fio. O ângulo entre as partes móveis da articulação 3, ajustado pelo atuador de SMA, será chamado de α_{SMA} e dado pela soma dos ângulos β e φ mostrados na Figura (2a).

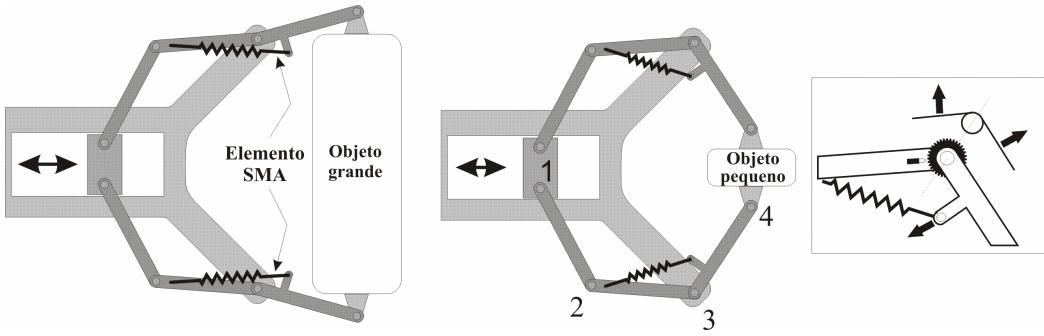


Figura 1. Representação esquemática da garra (Hessenbach e Stork, 1994).

No presente trabalho adotou-se um cilindro pneumático de 50mm de curso, que é suficiente para produzir uma garra leve e compacta com forças de compressão ajustáveis até 1000N. Por meio do ajuste na sua estrutura a garra torna-se capaz de manipular objetos entre 0 e 200mm (Hessenbach e Stork, 1994).

Para se obter movimentos angulares de amplitudes maiores, dentro do limite de deformação recuperável dos atuadores a serem utilizados, propõem-se a utilização de roldanas em torno das quais o fio é enrolado tantas voltas quantas forem necessárias para obtenção da variação de comprimento desejada, Figura (2b). Neste caso, enquanto uma das extremidades permanece fixa na estrutura da garra, toda a deformação é percebida na extremidade móvel do fio.

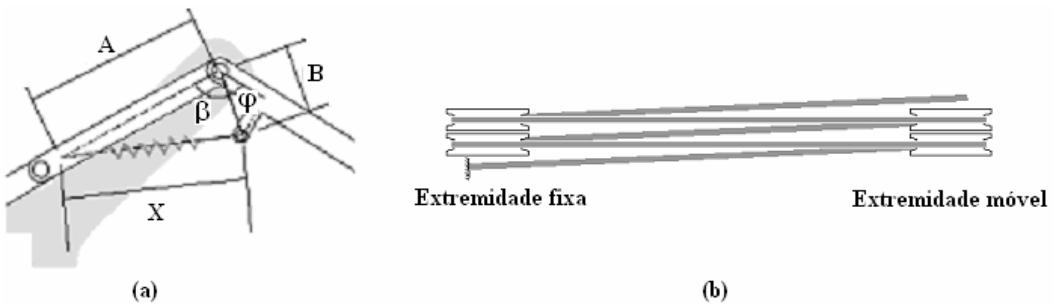


Figura 2. a) Ângulos β e φ . b) Fixação do fio com memória de forma via roldanas.

Neste trabalho adotou-se uma distância de 80mm entre os eixos das roldanas. Considerando que o fio percorre 4 voltas entre as roldanas, e que estas têm diâmetro de 25mm, o comprimento de fio limitado pelas roldanas será $4 * 80 + 4 * (\pi \cdot 12,5) = 477\text{mm}$. Para que o ângulo determinado pelo atuador com memória de forma - α_{SMA} - varie cerca de 90° , a extremidade livre do fio deve variar cerca de 41mm. Para um comprimento total não deformado de 600mm será observado um aumento de 41mm com uma deformação recuperável de 6,83%, resultando em 641mm. Assim, a extremidade livre do fio deve variar entre $600 - 477 = 123\text{mm}$ e $641 - 477 = 164\text{mm}$. A Figura (3a) mostra esquematicamente o braço ajustável da garra, com o fio de SMA deformado em 6,8% (pontilhado) e contraído (linha contínua).

Na Figura (2a) tem-se os triângulos que formam a estrutura da garra. Pela Lei dos Co-senos obtém-se o ângulo α_{SMA} em função da deformação do fio pela Equação (1). Assume-se que o fio não deformado tem 600mm de comprimento, dos quais 480mm estão entre as roldanas e 120mm formam o lado x na Figura (2a). Sendo assim tem-se:

$$\alpha_{SMA} = f(\varepsilon) = \beta + \varphi , \quad (1a)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{A^2 + B^2 - x^2}{2.A.B} \right), \quad (1b)$$

$$x = 60(\varepsilon + 1) - 48, \quad (1c)$$

onde ε é a deformação do fio, e o significado dos demais termos estão explicitados na Figura (2a).

Para as dimensões mostradas na Figura (3b) a Figura (4) mostra a relação não-linear entre o ângulo β e a deformação do fio ε . Pode-se verificar que para deformações que variam de zero a 7% o ângulo β varia de aproximadamente 0 a 97,2°. O ângulo φ é constante e determinado pela geometria da garra. No caso da garra proposta tem-se $A = 118\text{mm}$ e $B = 44\text{mm}$.

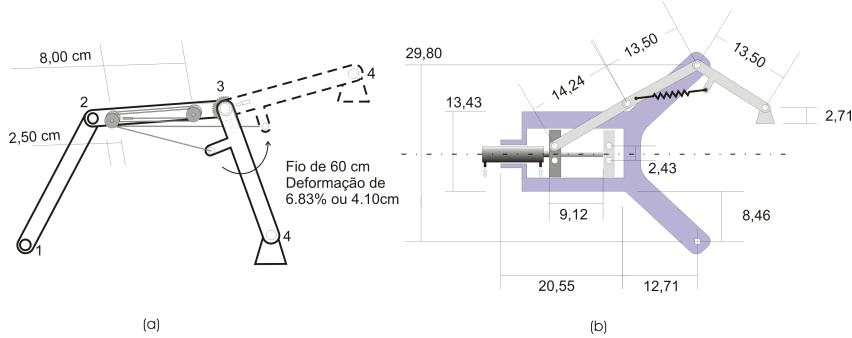


Figura 3. a) Membro auxiliar da garra com α_{SMA} variando cerca de 90°. b) Dimensões da garra.

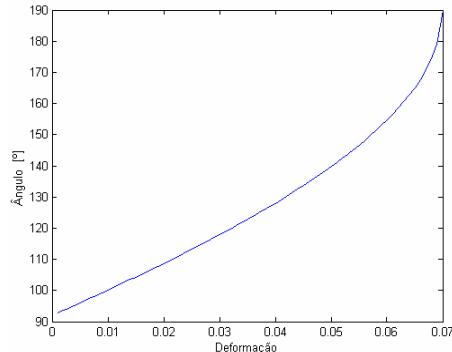


Figura 4. Curva deformação- ângulo α_{SMA} para $\varphi=10^\circ$.

A Figura (5) mostra a variação da estrutura da garra. Estando o fio de SMA frio e com deformação máxima, a garra se adapta a objetos grandes, dentro das medidas mostradas na Figura (5b). Estando o fio aquecido e contraído com deformação zero a garra manipula objetos menores, Figura (5a).

3. MODELAGEM DO SISTEMA

Para simular o comportamento dinâmico da garra foi implementado um sistema de controle de malha fechada para controlar o posicionamento dos membros da garra, e utilizou-se o modelo proposto por Brinson (1993) para descrever o comportamento do atuador com memória de forma.

3.1. Sistema de controle

A Figura (6) apresenta o diagrama de blocos do sistema de controle considerado. O posicionamento da garra é aqui denominado $y(t)$ e é a saída do sistema de controle. A entrada do sistema $u(t)$ é o valor desejado para $y(t)$ (a referência). O valor desejado $u(t)$ é comparado ao valor real $y(t)$. O erro $e(t)$ é trabalhado pelo controlador que determina a corrente necessária para aquecer o atuador e tentar zerar o erro $e(t)$.

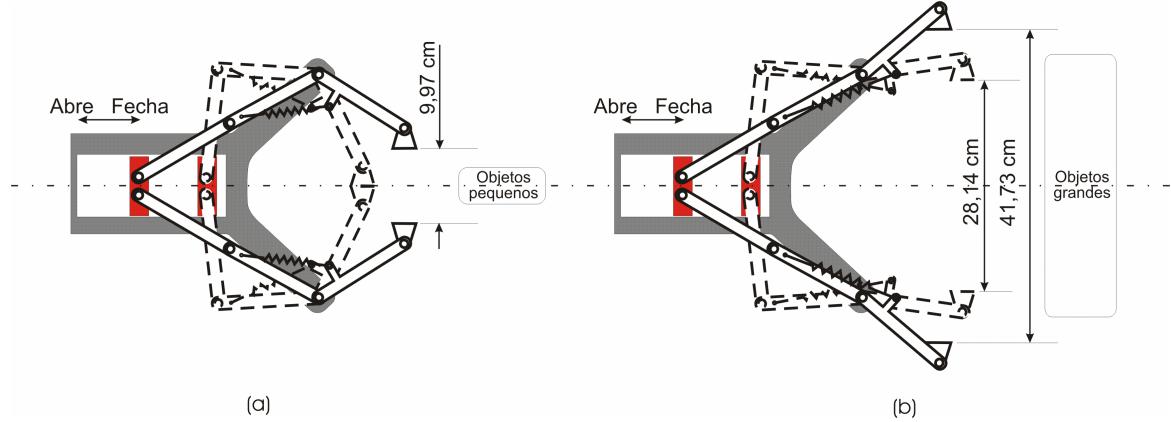


Figura 5. a) Ajuste da garra para objetos pequenos. b) Ajuste da garra para objetos grandes.

A troca de calor entre o atuador com memória de forma será descrita por uma equação de balanço de energia, incorporada ao modelo proposto por Brinson (1993) que irá simular o comportamento dos atuadores.

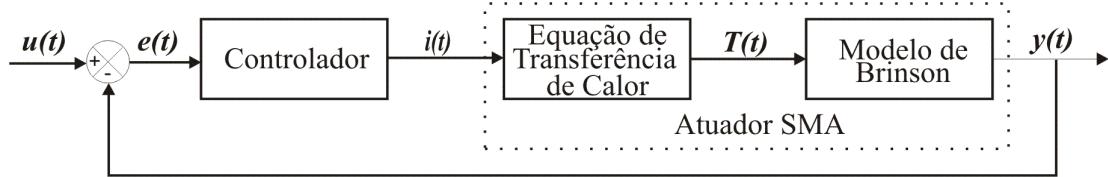


Figura 6. Sistema de controle de malha fechada.

O controlador a ser utilizado é do tipo Proporcional Integral Derivativo (PID), cuja saída é dada pela seguinte expressão:

$$Saída = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] = K_p e(t) + K_i \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (2)$$

onde K_p é o ganho proporcional, T_i é o tempo integral, T_d é o tempo derivativo, $K_i = K_p/T_i$ é o ganho integral e $K_d = K_p T_d$ é o ganho derivativo. A saída do sistema no caso em questão é o valor da corrente $i(t)$.

3.2. O modelo constitutivo para SMA

Tanaka e Nagaki (1982) propuseram um modelo para representar o comportamento termomecânico de SMA. Na forma integrada sua equação constitutiva pode ser escrita da seguinte forma:

$$\sigma - \sigma_0 = D(\varepsilon - \varepsilon_0) + \Omega(\zeta - \zeta_0) + \theta(T - T_0), \quad (3)$$

onde σ , ε , ζ e T são tensão, deformação, fração volumétrica de martensita e temperatura da liga. A função $D(\varepsilon, \zeta, T)$ representa o módulo de elasticidade do material, $\Omega(\varepsilon, \zeta, T)$ o tensor transformação e $\theta(\varepsilon, \zeta, T)$ o coeficiente térmico de expansão da liga. Assume-se, para a obtenção da Equação (3), que

as grandezas materiais D , Ω e θ são constantes, e as condições iniciais são dadas por σ_0 , ε_0 , ζ_0 e T_0 .

Na realidade, a Equação (3) não é capaz de representar o comportamento do material a temperaturas inferiores a Ms , nem a temperaturas mais altas quando alguma martensita induzida por temperatura estiver presente. Como visto anteriormente, o efeito memória de forma consiste da recuperação de deformação quasiplástica com o aquecimento acima de Af . Tal deformação quasiplástica é formada pela reorientação da fase martensítica a temperaturas inferiores a Ms .

Para corrigir esta deficiência Brinson (1993) propõe a decomposição da fração volumétrica de martensita ζ em duas componentes: uma para representar a martensita induzida termicamente e uma outra para representar a martensita induzida por tensão. Sendo assim, é possível considerar as diferentes contribuições separadamente, e representar também o processo de reorientação da martensita. Portanto, Brinson (1993) redefine a fração volumétrica de martensita ζ como

$$\zeta = \zeta_s + \zeta_T, \quad (4)$$

onde ζ_T representa a fração de martensita induzida por temperatura e ζ_s fração de martensita induzida por tensão. A partir dessa redefinição de ζ é possível representar tanto o efeito memória de forma iniciando com qualquer fração de martensita, quanto a pseudoelasticidade iniciando com 100% austenita. Com a introdução da Equação (4) em (3) tem-se:

$$\sigma - \sigma_0 = D(\varepsilon - \varepsilon_0) + \Omega_s(\zeta_s - \zeta_{s0}) + \Omega_T(\zeta_T - \zeta_{T0}) + \theta(T - T_0), \quad (5)$$

onde novamente assume-se que as funções materiais D , Ω_s , Ω_T e θ são constantes, e que σ_0 , ε_0 , ζ_{s0} , ζ_{T0} , e T_0 são as condições iniciais.

A hipótese de que as funções materiais D , Ω e θ são constantes é demasiadamente forte para representar o comportamento real das SMA. Experimentos indicam que o módulo de elasticidade depende da fração de martensita no material ζ . Assim, sendo D_m o módulo de elasticidade do material com 100% martensita, e D_a o módulo de elasticidade do material com 100% austenita, o módulo da liga é dado por (Brinson, 1993):

$$D(\varepsilon, \zeta, T) = D(\zeta) = D_a + \zeta(D_m - D_a), \quad (6)$$

Procura-se a solução geral por integração parcial, e a solução particular é determinada pela aplicação das condições iniciais σ_0 , ε_0 , ζ_0 e T_0 . Considera-se o caso geral de deformação residual ε_{res} menor que a deformação máxima recuperável ε_L após descarregamento até a tensão nula, e aplica-se a definição de deformação residual máxima para chegar a $\varepsilon_{res} = \varepsilon_L \zeta_s$. Dadas as condições iniciais $\sigma_0 = \varepsilon_0 = \zeta_{s0} = 0$ e finais $\sigma = 0$, $\varepsilon = \varepsilon_{res}$, ζ_s e $T = T_0$ e consequentemente $\zeta_T = \zeta_{T0}$, chega-se à equação constitutiva final para o comportamento das SMA com funções materiais lineares em relação à ζ .

$$\sigma - \sigma_0 = D(\zeta)\varepsilon - D(\zeta_0)\varepsilon_0 + \Omega(\zeta)\zeta_s - \Omega(\zeta_0)\zeta_{s0} + \theta(T - T_0), \quad (7)$$

A partir da Equação (7) é possível simular as curvas Tensão-Deformação a temperaturas constantes, e Deformação-Temperatura sob cargas constantes.

3.3 Temperatura em função da corrente elétrica

Até a Equação (7) a temperatura T é considerada uma função prescrita, sem se definir qual seria a forma de aquecimento do material para se atingir tal temperatura. Nas aplicações reais a temperatura é imposta por meio de uma corrente elétrica. Portanto, para que seja possível simular o

comportamento termomecânico de atuadores de SMA eletricamente ativados, é necessário associar à Equação (7) uma equação de balanço de energia que envolva corrente como entrada e temperatura como saída. Considerando que a troca de calor se dá predominantemente por convecção pode-se escrever:

$$mc_p \frac{dT}{dt} = Ri^2 + hA(T_{amb} - T), \quad (8)$$

onde m é a massa do material, c_p o calor específico, T_{amb} a temperatura ambiente, i a corrente elétrica, R a resistência elétrica do material, h o coeficiente de transferência de calor por convecção e A a área superficial em contato com o meio. A solução da Equação (8) foi obtida numericamente.

3.4. Modelagem da carga variável

Em várias aplicações de SMA o atuador é submetido a cargas que variam com a variação de suas dimensões. Este é o caso da garra apresentada neste trabalho. À medida que o fio se contrai a força que resiste à sua contração aumenta. Para modelar esta situação propõe-se o modelo apresentado na Figura 8. À medida que o fio é aquecido, ele se contrai e carrega o peso. Simultaneamente a carga vai aumentada devido à presença da mola. A tensão total atuante sobre o fio terá, portanto, além da tensão devida à carga constante, uma outra componente inversamente proporcional à deformação do fio, dada pela força da mola dividida pela área transversal do fio. Assume-se que a mola inicialmente não exerce força sobre o fio, ou seja, considera-se que ela está em estado de repouso quando o fio está em sua deformação máxima. A tensão no fio será então dada pela expressão

$$\sigma_{Mola} = \sigma_0 + k(\epsilon_0 - \epsilon), \quad (9)$$

onde k é a constante de mola.

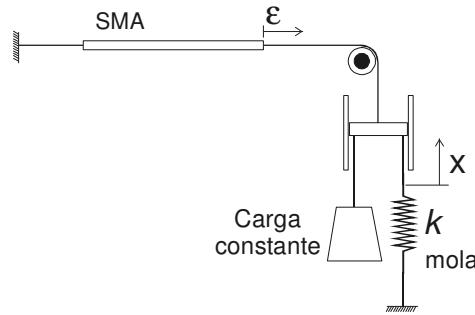


Figura 7. Modelo para simulação do ensaio Deformação–Temperatura sob carga variável.

Finalmente têm-se todos os elementos necessários para simular o comportamento dinâmico da garra.

5. ANÁLISE DINÂMICA DA GARRA

Considera-se nesta seção um controlador PID numa malha de controle de realimentação negativa como ilustrado na Figura 6. O objetivo é controlar o posicionamento dos membros auxiliares da garra através do controle do ângulo α_{SMA} . O sistema foi implementado em ambiente Matlab no qual utilizaram-se Equações a Diferenças Finitas para a solução numérica. O comportamento termomecânico do material foi simulado pelo modelo de Brinson (1993). O material considerado nas simulações foi a liga Ni₅₅Ti e suas propriedades são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades materiais da liga Ni₅₅Ti (Brinson, 1993).

D_a	67×10^3 MPa	M_f	9 °C	C_M	8 MPa/°C	ε_L	0.067 (6.7%)
D_m	26×10^3 MPa	M_s	18.4 °C	C_A	13.8 MPa/°C	m	5.0658×10^{-4} [Kg]
θ	0.55 MPa/°C	A_s	34.5 °C	σ_s^{cr}	100 MPa	R	89.1268 [Ω]
cp	490 [J/kg.K]	A_f	49 °C	σ_f^{cr}	170 MPa	h	180 [W/m ² .K]

Para um fio de 60cm de comprimento, simulou-se aqui a resposta do sistema para um controlador PID de parâmetros $K_p = 4$, $K_i = 2$, $K_d = 0.3$ a uma entrada que representa a operação típica do garra: uma série de valores discretos de posição do atuador de SMA. A variação do tamanho do fio no tempo é mostrada na Figura (8a) e a corrente aplicada ao fio na Figura (8b).

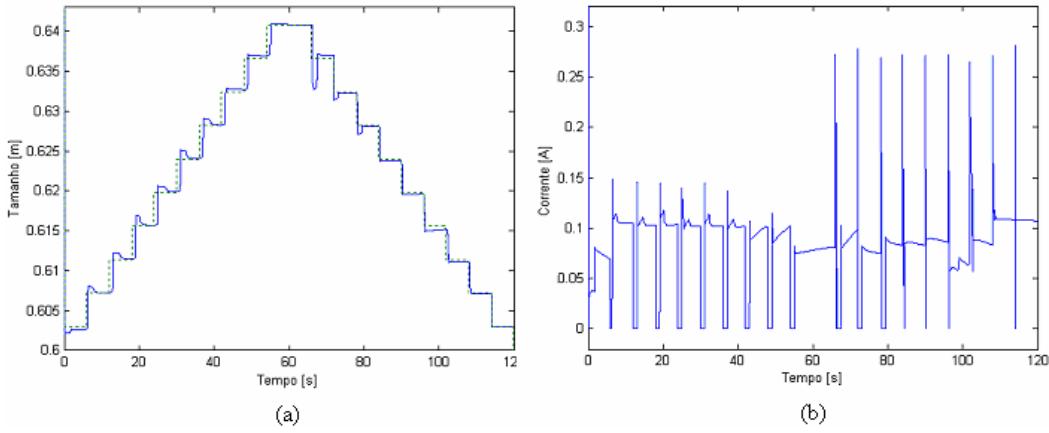


Figura 8. a) Resposta do sistema. b) Sinal de corrente aplicado aos fios.

As curvas da Figura (8) correspondem a dez ângulos de ajuste dos membros auxiliares da garra, ou dez faixas de tamanhos de objetos. A parte ascendente da curva mostrada na Figura (8a) corresponde ao resfriamento do fio e consequente aumento de tamanho, enquanto a parte descendente corresponde ao aquecimento e contração do fio. Nota-se que as respostas do sistema nos aquecimentos são mais rápidas, mas o valor de referência foi atingido em todos os degraus antes da transição seguinte. O fio opera dentro do regime de deformações recuperáveis do material, entre 0.34% e 7.65% de deformação, ou entre 60.0207 e 64.5903cm de comprimento. Observa-se que com uma estratégia de resfriamento suficientemente boa, o controle PID proposto é capaz de realizar bem a tarefa inicial de ajustar a estrutura da garra em intervalos curtos de tempo.

A curva da Figura (9) é obtida a partir das Equações (1) e mostra a variação da posição angular α_{SMA} no tempo. A variação do ângulo do atuador com a deformação do fio mostrada na Figura (4) é aproximadamente linear para deformações inferiores a 5%, mas é claramente não-linear para deformações superiores a isso. Como a variável utilizada para o controle foi o tamanho do fio, e não o ângulo do atuador, a não-linearidade aparece nos degraus mais altos, onde os ângulos são maiores e as deformações excedem 5%.

Para que todos os degraus da Figura (9) tenham a mesma amplitude, como prescrita pela função referência mostrada na Figura 10b, é necessário alterar o sistema de controle, utilizando como referência valores de posição angular, e não deformação do fio. Sob esta consideração foram obtidos os resultados mostrados na Figura (10a). O controlador calcula a deformação necessária para degraus sucessivos de 10° na posição angular, compensando a não-linearidade da curva na Figura (9). Observa-se que os degraus de deformação diminuem em amplitude, principalmente para deformações acima de 5%.

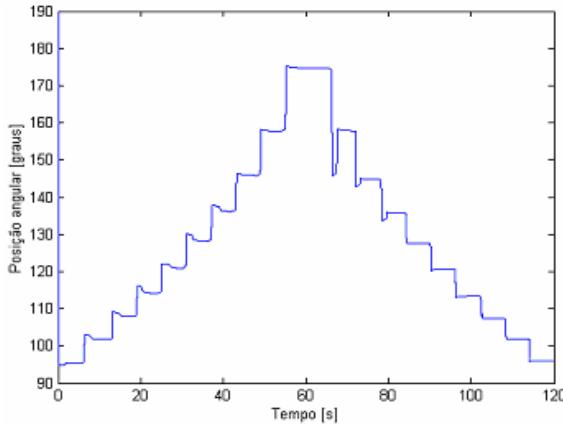


Figura 9. Variação não compensada de α_{SMA} para dez posições de ajuste do garra.

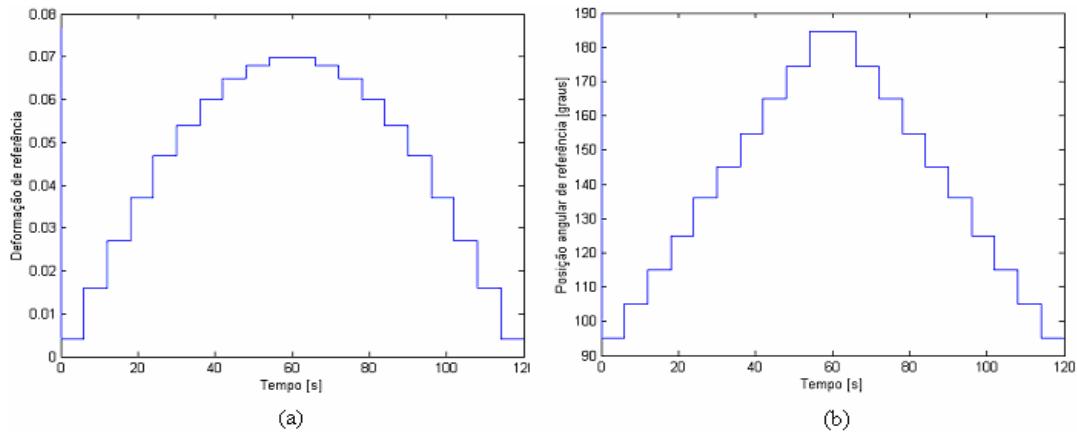


Figura 10. a) Deformação de referência não-compensada. b) Posição angular de referência.

A curva da Figura (11) mostra finalmente a resposta do sistema em posicionamento angular dos membros da garra. Os parâmetros do controlador são ajustados em $K_p = 3$, $K_i = 2$ e $K_d = 0.3$. Degraus sucessivos de amplitude de 10° são aplicados e removidos ao longo do tempo, e o atuador atinge os valores de referência tanto no resfriamento (curva ascendente) quanto no aquecimento (curva descendente). Pode-se observar o regime transitório em cada degrau. Existe, na maioria das respostas, um sobrepasso, e o erro de regime atinge zero, ou se aproxima bastante de zero em todas as respostas angulares. O resfriamento é mais lento, e exibe um atraso de cerca de 1 segundo em relação ao sinal de referência. No aquecimento tal atraso não ocorre, mas um maior sobrepasso está presente. O tempo de estabilização simulado é de aproximadamente 3 segundos. Portanto, um controlador PID se mostra capaz de controlar satisfatoriamente o posicionamento dos membros auxiliares da garra, desde que as considerações assumidas na simulação sejam satisfeitas.

Antes da simulação do comportamento dinâmico da garra procurou-se verificar se os modelos propostos eram capazes de fornecer resultados consistentes com o comportamento termomecânico das SMA. Para isso implementou-se primeiramente o modelo de Brinson (1993) para simular dois experimentos: i) a curva Deformação-Temperatura sob diferentes cargas constantes e ii) a curva Deformação-Temperatura sob cargas variáveis. A implementação foi realizada utilizando o pacote computacional Matlab. O material considerado foi um fio de Ni₅₅Ti com 0,001m de diâmetro, 0,447m de comprimento e área $A = 3,1616^4[\text{m}^2]$. Os dados utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 1. Os resultados obtidos estão consistentes com observações experimentais. Entretanto, por limitação de espaço, não puderam ser apresentados neste trabalho.

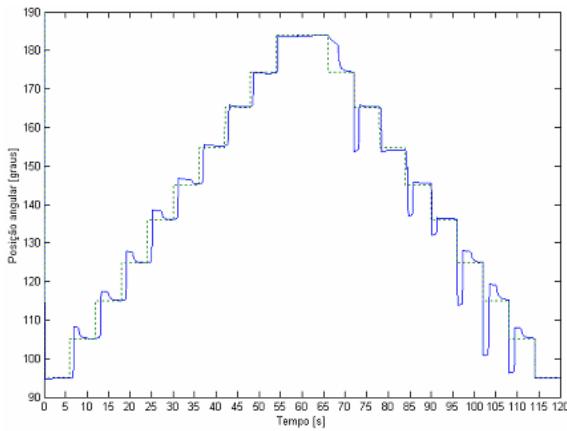


Figura 11. Resposta em posição angular.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um detalhamento, dimensionamento e análise dinâmica da garra idealizada Hesselbach and Stork (1990). Foi implementado um sistema de controle de malha fechada para controle de posicionamento dos membros auxiliares da garra, os quais são acionados por atuadores com memória de forma. O modelo proposto por Brison (1993) foi utilizado para simulação do comportamento termomecânico dos atuadores com memória de forma. Os resultados de uma análise dinâmica da garra mostraram a sua viabilidade técnica, e ilustrou a potencialidade das ligas com memória de forma para o desenvolvimento deste tipo de aplicação.

7. REFERÊNCIAS

- Brinson, L. C., 1993, "One-Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation with Non-Constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.4, pp. 229-242.
- Delaey, L., Krishnan, R. V., Tas, H., 1974, "Thermoelasticity, pseudoelasticity, and the memory effects associated with martensitic transformations. Part 1, Structural and microstructural changes associated with the transformations". *Journal of Materials Science*, Vol. 9, 1521-1535.
- Hesselbach, J. and Stork, H., 1994, "Electrically Controlled Shape Memory Actuators for Use in Handling Systems", *Proceedings of the first International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*, Pacific Grove, USA, pp. 277-282.
- Ikuta, K., 1990, "Micro/miniature shape memory alloy actuator", *Proceedings of the IEEE International Conference of Robotics and Automation*, pp. 2156-2161
- Krishnan, R. V., Delaey, L., Tas, H., 1974, "Thermoelasticity, pseudoelasticity, and the memory effects associated with martensitic transformations. Part 2, The macroscopic mechanical behaviour", *Journal of Materials Science*, Vol. 9, pp. 1536-1544.
- Mavroidis, C. 2002, "Development of Advanced Actuators Using Shape Memory Alloys and Electrorheological Fluids", *Res. Nondestructive Eval.* Springer Verlag, New York, 2002.
- Tanaka, K. and Nagaki, S., 1982, "A thermomechanical description of materials with internal variables in the process of phase transitions". *Ing. Arch.*, Vol 51, pp.287-299..
- Wayman, C. M., Duerig, T. W., 1990, "Engineering Aspects of Shape Memory Alloys", eds. Duerig, T. W., Melton, K. N., Stöckel, D., Wayman, C. M. Butterworth-Heinemann. pp. 3-20.

SIMULATION OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF A ROBOTIC GRIPPER BASED ON SHAPE MEMORY ACTUATORS

Lucas Puttini

Edson Paulo da Silva

Department of Mechanical Engineering, University of Brasília

Campus Universitário Darcy Ribeiro – Asa Norte

70910-900 – Brasília, DF, Brazil.

E-mail: dasilva@unb.br

Abstract: Robotic grippers are constructed to execute specific tasks in a well defined range of objects size. More versatile grippers may be developed by means of subsidiary systems to obtain more flexibility of objects size. For these subsidiary systems the response speed and efficiency are not of major importance, therefore the Shape Memory Alloys (SMA) appear as a promising solution. The starting point of the present work was a proposed subsidiary system for a robotic gripper based on shape memory actuators available in the literature. The gripping force is performed by a pneumatic cylinder, and the subsidiary system is used to pre-adjust the range size of objects to handle, by means of heating and cooling of the shape memory actuators. The present work focuses the simulation of the dynamic behavior of this gripper. A closed loop control system was then implemented, in which the behavior of the shape memory actuators is described by means of a model for SMA available in the literature. Some basic experiments with PID controllers were carried out and the obtained results illustrate the viability of the proposed gripper, and the potential of the SMA for the development of such kind of application.

Keywords: *shape memory actuators, advanced actuators, robotic grippers;*