

CONTROLE DE VIBRAÇÃO DE VIGAS FLEXÍVEIS USANDO ATUADORES DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Edson Paulo da Silva

Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.
e-mail: dasilva@vesper.demec.ufmg.br

Alexandre Luiz Amarante Mesquita

Universidade Federal do Pará, Departamento de Engenharia Mecânica, R. Augusto Corrêa 01, 66075-110, Belém, PA, Brasil.
e-mail: amarante@sc.usp.br

Resumo

Os atuadores baseados nas ligas com memória de forma têm se revelado uma alternativa bem atrativa para sistemas onde grandes forças, grandes deformações e baixas frequências são requeridas. Neste trabalho, exemplifica-se o emprego de tais atuadores para o controle ativo e passivo de vibração de uma viga flexível. Os atuadores consistem, basicamente, de fios de NiTi fixados sobre a superfície da viga. Dada uma deflexão inicial na viga, os fios são então estrategicamente aquecidos por uma corrente elétrica, e resfriados pelo ar ambiente, de forma a suprimir mais rapidamente a vibração da viga. Dois tipos de atuadores são apresentados: um explorando o efeito memória de forma, para o controle ativo, e outro explorando o efeito pseudoelástico, para controle passivo. São comparados o tempo necessário para a supressão da deflexão e sua amplitude no tempo, com e sem os atuadores. Os resultados obtidos ilustram a potencialidade destes atuadores como meio viável de amortecer vibrações.

Palavras - chave: Memória de forma, Pseudoelasticidade, Atuadores, Controle ativo, Controle passivo.

1. INTRODUÇÃO

As ligas com memória de forma - *Shape Memory Alloys* – *SMA*s - são materiais metálicos capazes de assumir uma forma previamente definida, quando sujeitos a certas temperaturas. Esta dependência da temperatura está associada ao fato de que tais ligas assumem diferentes fases cristalinas em função da temperatura. A Figura 1 ilustra esquematicamente num diagrama carga x deformação o comportamento das ligas com memória de forma. Abaixo de uma determinada temperatura característica denominada M_f (*martensite finish*), o material se encontra numa fase martensítica, a qual é caracterizada nessas ligas por suas inúmeras variantes, as quais possuem diferentes orientações cristalográficas (Wayman, 1975; Shimizu & Tadaki, 1987; Otsuka & Wayman, 1998). Se esta estrutura for submetida a um nível de tensão suficientemente alto, veja Figura 1a, observa-se, após um comportamento inicialmente elástico (A→B), um processo de deformação a um nível carga P_{Kr1} praticamente constante (B→C). Após atingir um determinado estado de deformação (ponto C), também característico

para cada liga, o material volta a se comportar elasticamente (C→D). Caso o carregamento seja mantido, o material atinge um determinado nível de tensão, a partir do qual se comportará plasticamente. Após o descarregamento (D→E), o corpo mantém a sua configuração deformada (ponto E), como numa deformação plástica. A este comportamento dá-se o nome de *quasiplasticidade* (Müller, 1992), e ele está associado a um processo de reorientação das diferentes variantes da martensita, as quais sob uma tensão suficientemente alta têm suas diferentes orientações convertidas na direção de apenas uma delas, de onde então surge a relativa enorme deformação quasiplástica (Wayman, 1975; Shimizu & Tadaki, 1987; Otsuka & Wayman, 1998).

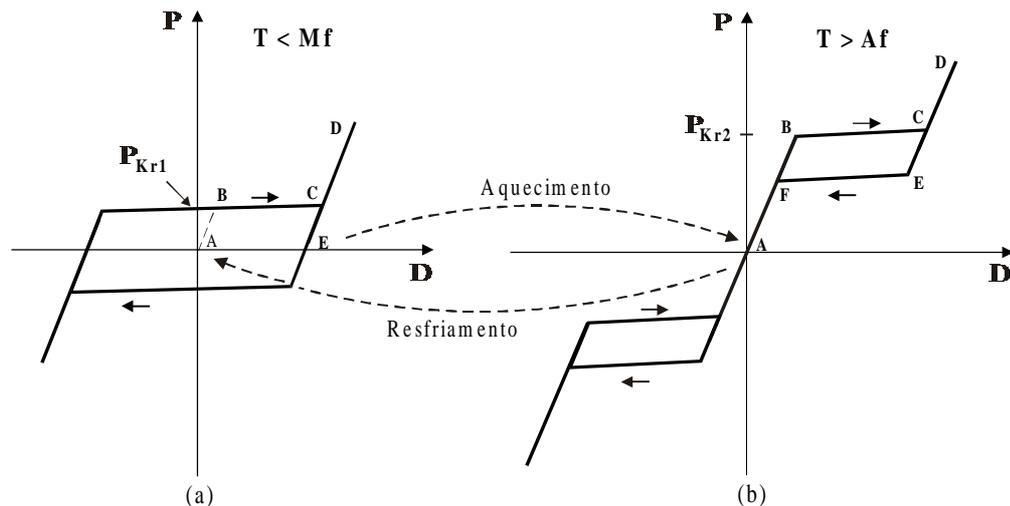


Figura 1. Comportamento termomecânico das ligas com memória de forma: a) Quasiplasticidade. b) Pseudoelasticidade - Esquemático.

Acima de uma outra temperatura característica denominada A_f (*Austenite finish*), essas ligas se encontram numa outra fase denominada austenita. Se esta estrutura for submetida a uma determinada carga $P_{Kr2} > P_{Kr1}$, veja Figura 1b, observa-se novamente, após um comportamento inicialmente elástico (A→B), um processo de deformação a um nível de tensão praticamente constante (B→C), após o qual observa-se novamente um comportamento elástico (C→D). Com o descarregamento, o corpo retorna à configuração original, porém a um nível de tensão mais baixo (D→E→F→A). Este comportamento é denominado pseudoelasticidade. Elástico porque o corpo retorna à configuração original, e pseudo porque durante os processos de carregamento e descarregamento ele percorre uma histerese. Esse comportamento é também conhecido por *superelasticidade*. Ao comportamento pseudoelástico está associada uma transformação de fase martensítica mecanicamente reversível induzida por tensão (Wayman, 1975; Shimizu & Tadaki, 1987; Otsuka & Wayman, 1998).

Se o corpo deformado quasiplasticamente for aquecido acima de A_f , observa-se que ele muda de forma, assumindo uma configuração previamente imposta por determinados tratamentos termomecânicos (E na Figura 1a → A na Figura 1b). À esta mudança de forma, ou ao "desaparecimento" da deformação quasiplástica com o aquecimento dá-se o nome de efeito memória de forma. Este processo está associado à transformação da fase martensítica reorientada para a austenítica. Essa mudança de forma se deve ao fato de que acima de A_f , e num estado livre de tensões – ponto A na Figura 1b - a austenita é a única fase termodinamicamente estável, e por isso ela se estabelece (Wayman, 1975; Shimizu & Tadaki,

1987; Otsuka & Wayman, 1998). Como exemplos de ligas com memória de forma, pode-se citar, entre outras, CuZnAl, CuAlNi, NiTi, NiTiCu, FePt, FePd e FeMnSi (Eucken, 1992). Tanto na quasiplasticidade quanto na pseudoelasticidade as deformações reversíveis podem chegar em algumas ligas a 10%, sendo 7% típico para as ligas NiTi (Wayman & Duerig, 1990).

Além da mudança de forma como explicado anteriormente, com a transformação da martensita para a austenita algumas ligas chegam a ter seu módulo de elasticidade triplicado (Wayman, 1975; Shimizu & Tadaki, 1987; Otsuka & Wayman, 1998). Somente esta variação do módulo de elasticidade possibilita o desenvolvimento de aplicações muito interessantes, principalmente em estruturas adaptativas para o controle de propriedades dinâmicas. No presente trabalho, será explorado tanto o efeito memória de forma quanto o pseudoelástico para exemplificar o emprego de ligas com memória de forma para o controle ativo e passivo de vibração fazendo-se uso de uma viga flexível.

2. APARATO EXPERIMENTAL

Para a realização dos experimentos, foi usado o aparato experimental mostrado esquematicamente na Figura 2. A viga engastada é constituída de uma barra de aço com espessura de 0,5 mm e largura de 16 mm. O seu comprimento é de 240 mm. Os atuadores constam basicamente de dois fios de NiTi de 0,29 mm de diâmetro e 53 mm de comprimento fixados opostamente na extremidade engastada da viga

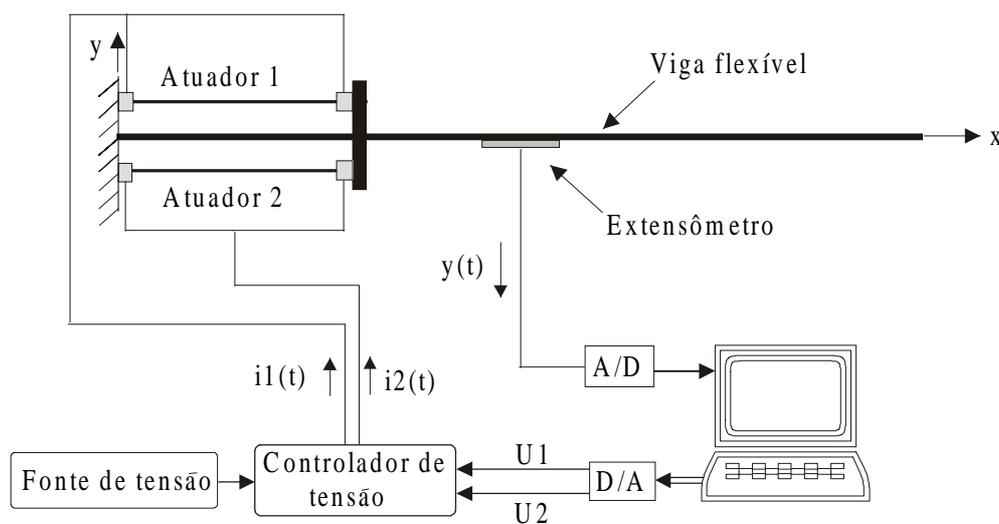


Figura 2. Aparato experimental – Esquemático.

A deformação no centro da viga é medida por meio de um extensômetro e enviado a um computador através de um conversor A/D. A partir do sinal $y(t)$ do extensômetro, determina-se a deflexão na extremidade livre da viga. Esta deflexão é utilizada neste trabalho como entrada para o sistema de controle. Aqui este sinal é comparado com a deflexão desejada para a viga, ou seja, uma pequena tolerância δ em torno da posição de repouso da viga. O erro é então usado para ativar os atuadores 1 e 2, de acordo com as estratégias de controle apresentadas a seguir. Para a aquisição e tratamento dos sinais é utilizado o pacote Matlab/Simulink/Reallink32. O aquecimento dos fios com memória de forma é realizado através de uma fonte de tensão controlada por um controlador de tensão, ou seja, controla-se a tensão e a corrente se instala por si própria, de acordo com a resistência elétrica do fio, e a tensão induzida segundo a lei de Ohm. No caso do controle ativo as tensões $U_1(t)$ e $U_2(t)$, e

consequentemente as correntes $i_1(t)$ e $i_2(t)$ respectivamente são funções do erro e calculadas por um controlador. No atuador pseudoelástico elas são constantes e têm valores grandes o suficiente para manter os fios a uma temperatura superior a A_f , ou seja, para mantê-los no estado austenítico. Tanto na aquisição de dados quanto nos cálculos de controle trabalha-se com uma frequência de 2 kHz.

3. CONTROLE ESTRUTURAL USANDO LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Partindo dos efeitos memória de forma e pseudoelásticos, Jia e Rogers (1989) propõem dois conceitos para o controle estrutural: sintonização ativa de propriedades (*APT – Active Properties Tuning*) e sintonização ativa de energia de deformação (*ASET – Active Strain Energie Tuning*). No caso da sintonização ativa de propriedades, o elemento com memória de forma é instalado como reforçador numa estrutura composta. Uma vez que o módulo de elasticidade dessas ligas varia enormemente com o aquecimento, controlando-se o aquecimento pode-se, portanto, controlar tanto a rigidez quanto a resistência da estrutura como um todo. O segundo princípio, sintonização de energia de deformação, baseia-se no mesmo mecanismo. Aqui, entretanto, os elementos com memória de forma são pré-deformados antes da instalação na estrutura. Dessa forma, tem-se mais um parâmetro que é a tensão de recuperação de forma gerada durante o aquecimento.

Schetky (1992) associa a esses dois princípios o controle ativo de forma (*ASC – Active Shape Control*). O elemento com memória de forma é pré-deformado e montado a uma certa distância do eixo neutro da estrutura. Quando energizados, os momentos gerados na recuperação de forma dos atuadores deformam a estrutura. Semelhantemente aos dois casos anteriores, pode-se controlar a forma da estrutura controlando-se o aquecimento dos atuadores.

Todos os três princípios aqui brevemente expostos podem também ser explorados instalando-se os atuadores diretamente sobre a estrutura cujas propriedades dinâmicas ou forma deve ser influenciada (Da Silva, 1999).

3.1 Controle ativo de vibração - Atuador com memória de forma

Aqui explora-se o efeito memória forma seguindo, basicamente, o princípio *ASET*, entretanto os atuadores são fixados diretamente sobre a superfície da estrutura, figura 2. As entradas do sistema de controle, o qual é mostrado na Figura 3, são a deflexão da viga, aqui denominada $y(t)$, e o valor desejado para a deflexão $r(t)$. A saída do controlador é uma tensão elétrica $U(t)$, a qual deve ser induzida no fio, a qual permite o fluxo de uma corrente elétrica que por sua vez aquece o fio pelo efeito Joule.

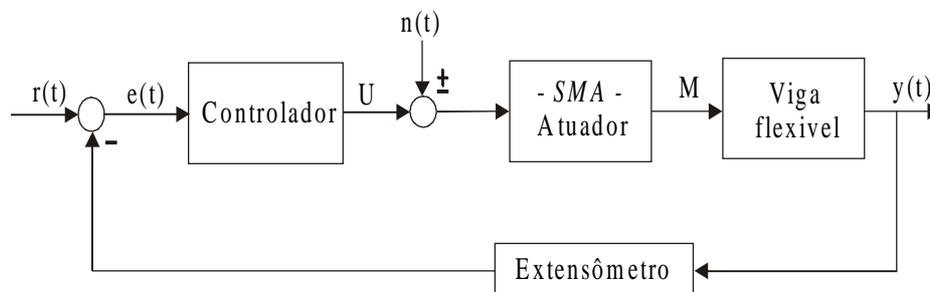


Figura 3. Diagrama de blocos do sistema de controle ativo.

A estratégia de controle é ilustrada na Figura 4. Se o módulo do erro $e(t)$ for menor ou igual à tolerância δ , ambos os atuadores são desenergizados. Se a viga for flexionada no sentido positivo de y , $e(t) < 0$ e o atuador 2 é energizado, o qual gera o momento $M2$ que tende a fletir a viga no sentido oposto. Caso contrário, ou seja, $e(t) > 0$, o atuador 1 é ativado enquanto o 2 é desativo. O momento $M1$ tende então a flexionar a viga no sentido positivo de y .

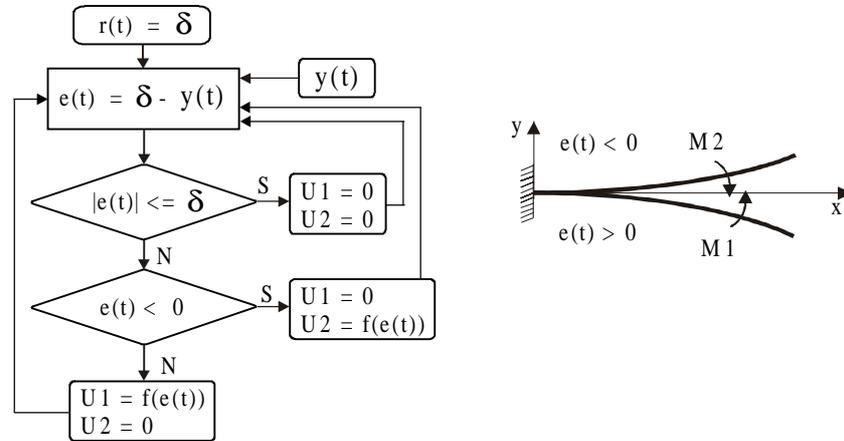


Figura 4. Estratégia de controle ativo – Atuador com memória de forma.

3.2 Controle passivo - Atuador pseudoelástico

Nesse atuador explora-se o efeito pseudoelástico, ou seja, basicamente o que se descreve no conceito *APT*. Entretanto, os elementos pseudoelásticos não são empregados como reforçadores numa estrutura composta, mas sim, fixados diretamente sobre a estrutura, veja Fig. 2. Os fios são mantidos constantemente aquecidos a uma temperatura superior à A_f , estando assim num estado austenítico. Ao ser imposta a deflexão inicial na viga, o atuador 2 é deformado pseudoelasticamente, enquanto o atuador 1 está também no estado austenítico porém livre de tensão e deformação. Quando a viga é deixada vibrar, o atuador 2 tende a defletir a viga no sentido oposto ao da deflexão inicial, enquanto o atuador 1 nenhuma influência exerce sobre o sistema. Abaixo da posição de repouso da viga, ocorre o oposto, ou seja, o atuador 1 tende a flexionar a viga na direção positiva do eixo y enquanto o atuador 2 se encontra num estado livre de tensão e deformação, não influenciando o comportamento da viga. Este processo se repete até que a deflexão da viga seja menor do que tolerância δ em torno da posição de repouso.

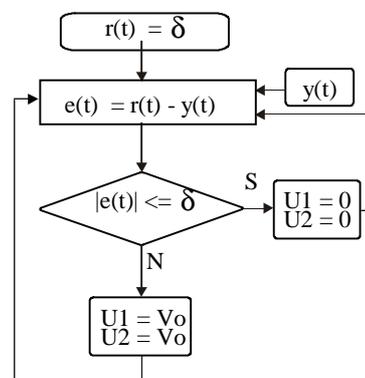


Figura 5. Estratégia de controle passivo – Atuador pseudoelástico.

4. EXPERIMENTOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com os atuadores apresentados anteriormente. Tendo em vista o objetivo maior do trabalho que é mostrar como se pode usar ligas com memória de forma para o controle de vibração, menor atenção foi dada ao estudo de diferentes estratégias de controle e à variação de parâmetros.

Para o controle ativo foi empregado um controlador proporcional com um ganho de $K_p=1,5$. O valor máximo da tensão elétrica induzida é de 2V, para a qual é permitida uma corrente elétrica máxima de 1A. A Figura 6, mostra a resposta obtida com esses dados em comparação com a resposta do sistema em malha aberta. A Figura 7 mostra o resultado obtido com o atuador pseudoelástico sendo aquecido com uma corrente elétrica de 1,5A e uma tensão de 1V. A temperatura do atuador neste caso é de aproximadamente 96°C. Em ambos experimentos tem-se $\delta = 2,0\text{mm}$.

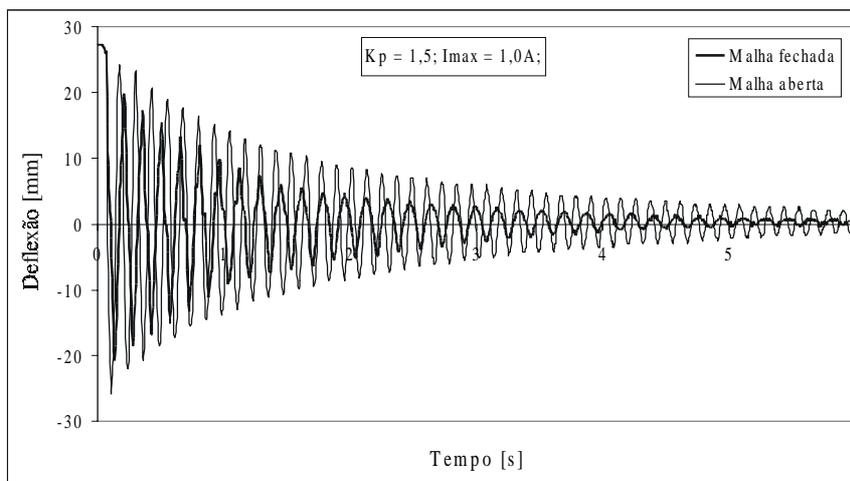


Figura 6. Resposta sob controle ativo – $K_p=1,5$.

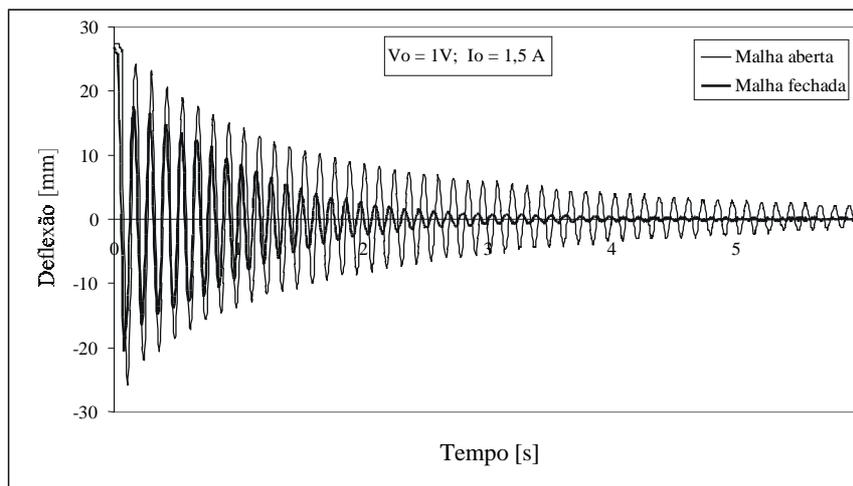


Figura 7. Resposta sob controle passivo – $I_{max} = 1,0\text{A}$.

Em ambos os casos, observa-se uma considerável atenuação da deflexão. Como pode-se observar claramente pelas Figuras 6 e 7, o atuador pseudoelástico apresenta um melhor resultado, suprimindo a deflexão da viga mais rápida e intensamente do que no caso do

atuador com memória de forma. O desempenho deste último pode ser melhorado com o emprego de atuadores mais eficientes, tema este que será tratado em futuros trabalhos.

5. CONCLUSÕES

Os conceitos básicos empregados no uso de ligas com memória de forma para o controle estrutural são brevemente introduzidos. Apresentou-se então como é possível amortecer vibração em uma viga flexível ativa e passivamente usando um atuador com memória de forma e um pseudoelástico, respectivamente. O atuador pseudoelástico apresenta melhores resultados, atenuando a deflexão da viga no tempo mais rápida e intensamente. Os resultados obtidos com ambos atuadores ilustram a potencialidade das ligas com memória de forma para o controle de vibração.

6. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao DAAD e o segundo ao PICDT-CAPES pelo apoio financeiro aos seus respectivos projetos de doutorado.

7. BIBLIOGRAFIA

- Da Silva, E. P., 1999, "An Adaptive Flexible Beam Actuated by Shape Memory Alloy". To appear in the Journal of Intelligent Material Systems and Structures.
- Eucken, S., (Editor), 1992, "Progress in Shape Memory Alloys", Ed. DGM – Informationsgesellschaft, Oberursel, Germany.
- Jia, J., and Rogers, C. A., 1989, "Formulation of a Mechanical Model for Fiber Reinforced Composites with Embedded SMA Actuators", Proceedings of 8th Biennial Conference on Failure Prevention and Reliability, Montreal, Canada, pp. 203-210.
- Müller, I., 1992, "Thermoelastic properties of shape memory alloys", European Journal of Mechanics A/Solids, Vol. 11, Special issue, pp. 173-184.
- Otsuka, K., Wayman, C. M., 1998, "Shape Memory Materials", Editores Otsuka, K., Wayman, C. M., Ed. Cambridge University Press, pp. 27-49.
- Schetky, L. McD., 1992, "The Role of Shape Memory Alloys in Smart/Adaptive Structures", Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 246, Editores C. T. Liu, H. Kunsman, K. Otsuka and M. Wuttig, pp. 299-307.
- Shimizu, K., Tadaki, T., 1987, "Shape Memory Alloys", Editor Funakubo, H., Ed. Gordon and Breach Science Publishers, pp. 1-60.
- Wayman, C. M., 1975, "Shape Memory Effects in Alloys", Editor Perkins. J., Ed. Plenum Press, NY, pp. 1-27.
- Wayman, C. M., Duerig, T. W., 1992, "Engineering Aspects of Shape Memory Alloys", Editores Duerig, T.W., Melton, K. N., Stöckel, D., Wayman, C. M., Ed. Butterworth-Heinemann, pp. 3-20.