

# 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**

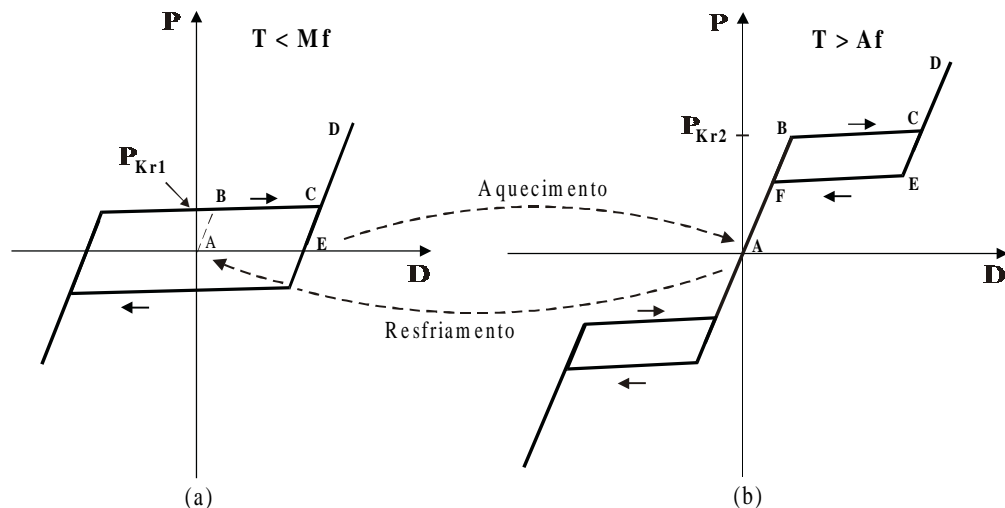
Os atuadores baseados nas ligas com memória de forma têm se revelado uma alternativa bem atrativa para sistemas onde grandes forças, grandes deformações e baixas frequências são requeridas. Neste trabalho, exemplifica-se o emprego de tais atuadores para o controle ativo e passivo de vibração de uma viga 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).

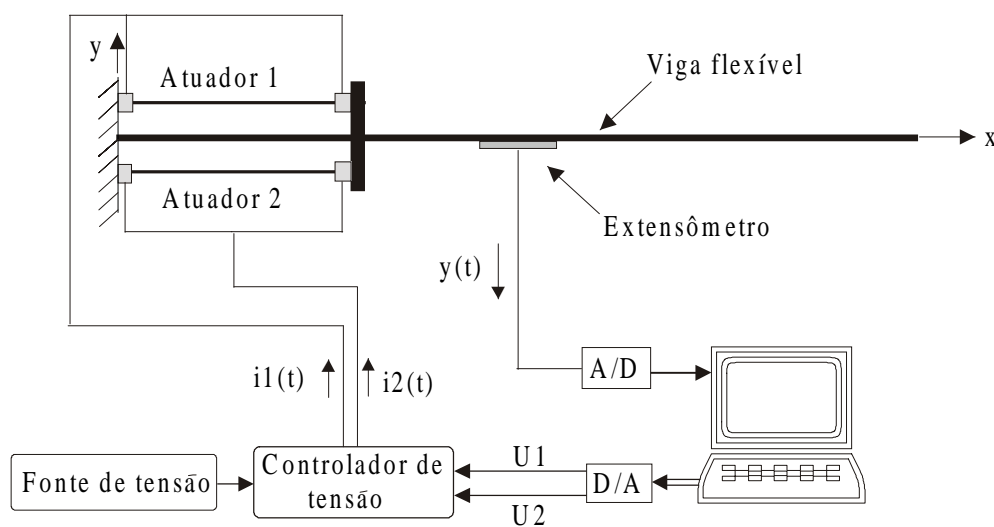
Se o corpo deformado quasiplasticamente for aquecido acima de  $A_f$ , observa-se que ele muda de forma, assumindo uma configuração previamente imposta por determinados tratamentos termomecânicos (E na Figura 1a → A na Figura 1b). À esta mudança de forma, ou ao "desaparecimento" da deformação quasiplástica 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  $\delta$  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

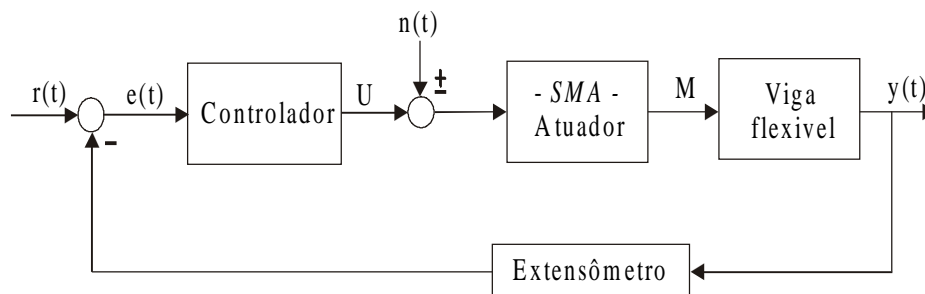
Partindo dos efeitos memória de forma e pseudoelásticos, Jia e Rogers (1989) propõem dois conceitos para o controle estrutural: sintonização ativa de propriedades (*APT – Active Properties Tuning*) e sintonização ativa de energia de deformação (*ASET – Active Strain Energie Tuning*). No caso da sintonização 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).

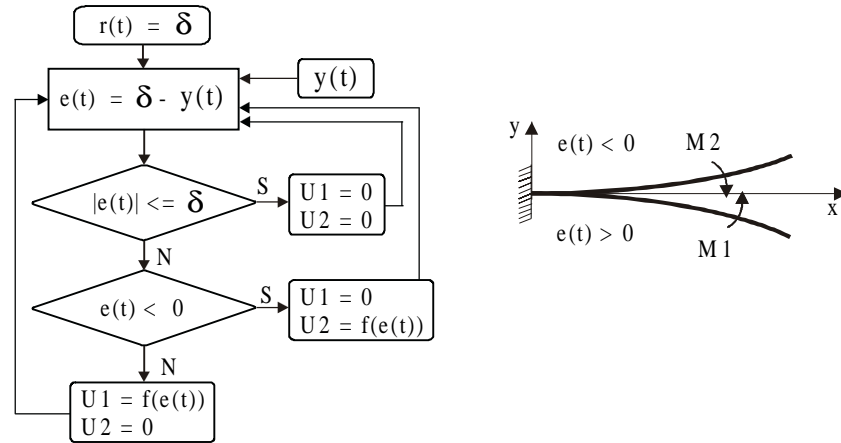
#### 3.1 Controle ativo de vibração - Atuador com memória de forma

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.

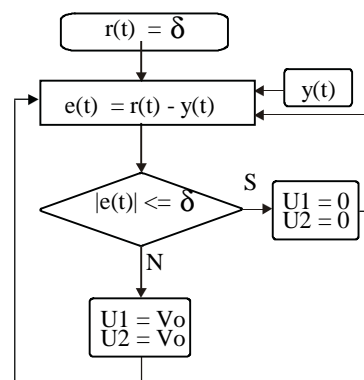
A estratégia de controle é ilustrada na Figura 4. Se o módulo do erro  $e(t)$  for menor ou igual à tolerância  $\delta$ , ambos os atuadores são desenergizados. Se a viga for flexionada no sentido positivo de  $y$ ,  $e(t) < 0$  e o atuador 2 é energizado, o qual gera o momento  $M2$  que tende a fletir 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  $\delta$  em torno da posição de repouso.

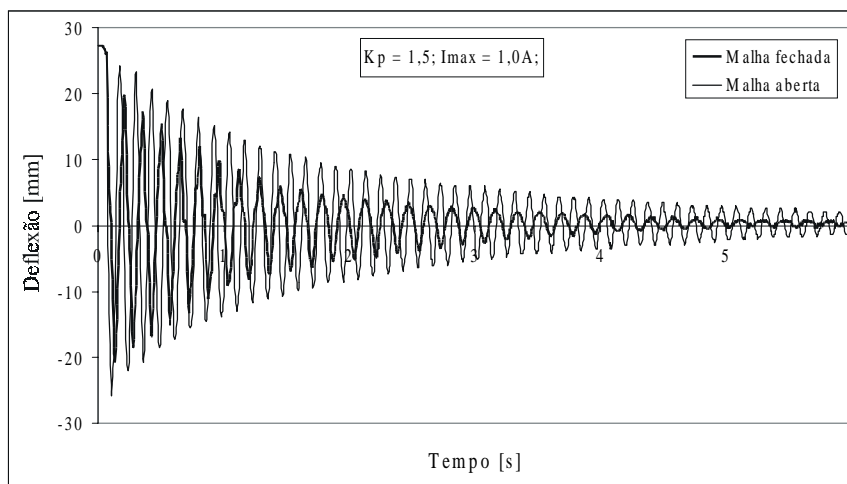


**Figura 5.** Estratégia de controle passivo – Atuador pseudoelástico.

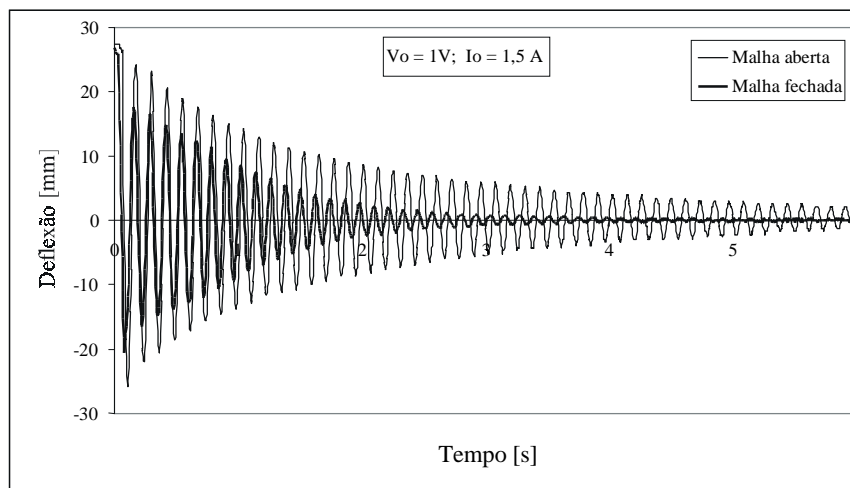
#### 4. EXPERIMENTOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

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 8<sup>th</sup> 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.