

TRABALHO APRESENTADO NA COBEM 97
EM CDROM

**MATERIAIS COM EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA,
CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS E POSSÍVEIS APLICAÇÕES /
MATERIALS WITH SHAPE MEMORY EFFECT, MAIN CHARACTERISTICS AND
POSSIBLE APPLICATIONS**

Jorge Otubo ^(1,2), Paulo Roberto Mei ⁽¹⁾ e Sadamu Koshimizu ⁽²⁾

(1) FEM, DEMA, UNICAMP, 13084-970, CP 6122, Campinas, SP.

(2) IPEN, CNEN, 05508-900, S. Paulo, SP - E-mail: jotubo@fem.unicamp.br

Abstract

Shape Memory Effect is the term used to describe the ability of certain materials to recover its original shape upon plastic deformation. Conventional materials when plastically deformed beyond the elastic limit present plastic deformation. This work will present the main characteristics of these kind of materials such as the reversibility of martensitic transformation, one way and two way shape memory and pseudoelasticity. Also it will be shown how these peculiar properties can be or are used in practical applications in areas such as naval, aerospace, automobile, nuclear, medicine, etc. Beside that this group, which is working with the development of shape memory alloy since 1994, intend to interact with the engineering community aiming mainly the possibility of exploring practical applications.

Keywords

Efeito de Memória de Forma (shape memory effect), transformação martensítica (martensitic transformation), pseudo-elasticidade (pseudo-elasticity), atuadores (actuators).

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho pretende dar uma visão geral sobre o que seja o fenômeno do Efeito Memória de Forma (EMF), suas características e principais aplicações sem a pretensão de ser original. O grupo vem trabalhando com ligas que apresentam este tipo de comportamento desde 94 e a intenção é interagir com a comunidade da área de Engenharia visando principalmente desenvolver aplicações práticas.

2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO EMF

O EMF poderia ser definido da seguinte forma: o EMF é a capacidade de certos materiais voltarem ao estado ou à forma original com o aquecimento em temperaturas acima de A_F (temperatura de fim da transformação da martensita em austenita) após serem deformados plasticamente no estado martensítico. Ligas convencionais quando deformadas além do seu limite elástico apresentam deformação plástica permanente.

Fisicamente, o EMF está relacionado à transformação martensítica cristalograficamente reversível. Apesar de não ser uma condição necessária, a transformação martensítica associada ao EMF é geralmente termoelástica. Ligas a base de ferro que apresentam o EMF são geralmente do tipo não termoelástico. A figura 1 (Wayman, 1983) mostra esquematicamente todo o processo de transformação. Se um monocristal na fase austenítica for resfriado abaixo da temperatura M_f (temperatura de fim da transformação da austenita em martensita), este se transformará em até 24 variantes (24 planos de hábito cristalograficamente equivalentes) de martensita auto-acomodante, sem mudança de forma macroscópica. No entanto, se uma tensão (por exemplo, tração) for aplicada, essa multiorientação tenderá a desaparecer resultando em uma martensita de orientação única. Schroeder e Wayman (Schroeder, 1977a), estudando monocristal de Cu-Zn, mostraram que isto era causado pela reorientação das maclas na direção preferencial e também devido à conversão de certas placas de martensita orientadas desfavoravelmente para aquelas orientadas favoravelmente. Isto é, a placa com orientação preferencial cresce às custas de outra com a movimentação da interface martensita-martensita. Como resultado final, das 24 variantes, restará aquela cuja componente de cisalhamento da deformação de forma permita o máximo de alongamento da amostra como um todo na direção do eixo de tração. A recuperação de forma ou a reversão do monocristal de martensita em austenita é obtida com o aquecimento da amostra acima da temperatura A_1 (temperatura de início da transformação da martensita em austenita) e na temperatura A_f o ciclo é completo. A esta recuperação de forma é dado o nome de *Efeito de Memória de Forma*.

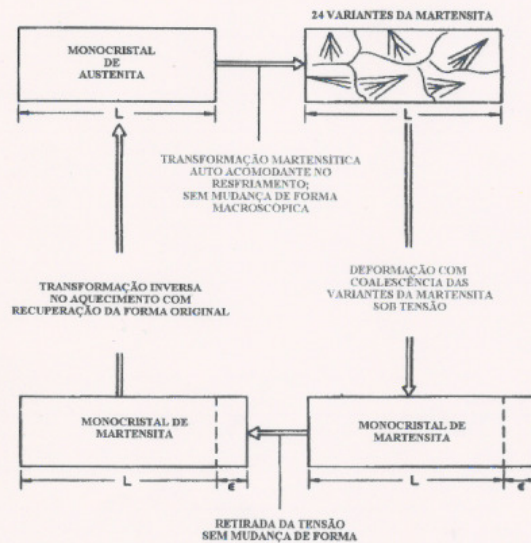


Figura 1. Representação esquemática do processo de deformação associado com EMF (Wayman, 1983).

2.1 Efeito de memória de forma unidirecional (one way shape memory), bidirecional forçado e bidirecional (two way shape memory)

Deve se observar que, geralmente, após a recuperação da forma a alta temperatura, posterior resfriamento não traz o material ao estado deformado. Isto é, o efeito de memória de forma é irreversível no sentido de que novo ciclo se consegue somente com nova deformação no estado martensítico e novo aquecimento em temperatura acima de A_F . Estes materiais que apresentam memória em um único sentido são denominados de “ligas com memória de forma unidirecional” ou “one way shape memory alloys”.

Agora, se uma força externa for aplicada a cada ciclo, ter-se-á o efeito de memória de forma bidirecional forçado como acontece em muitas aplicações práticas.

Várias ligas que apresentam memória de forma unidirecional podem ser condicionadas ou treinadas a possuírem memória de forma reversível. Isto é, atingido este condicionamento, o objeto “estica” quando ocorre a transformação austenita \rightarrow martensita (resfriamento) e “encurta” quando ocorre a transformação inversa martensita \rightarrow austenita (aquecimento) podendo repetir o processo a cada ciclo. É dito que essas ligas possuem “memória de forma bidirecional” ou “two way shape memory”. Segundo Schroeder e Wayman (Schroeder, 1977b), que trabalharam com monocristal de Cu-39,8Zn, existem duas maneiras de condicionar ou treinar as ligas a terem um EMF bidirecional: a primeira consiste em esfriar a amostra abaixo da temperatura M_F e deformá-la (por tração, compressão, torção, etc.) para produzir uma variante de martensita preferencial, como descrito anteriormente. Posteriormente, aquecê-la acima da temperatura A_F para a recuperação da deformação. Este processo é repetido várias vezes com a deformação da amostra no estado martensítico sempre feita da mesma forma; uma outra maneira envolve a deformação da amostra entre temperaturas M_I (temperatura de início da transformação martensítica) e M_D (temperatura máxima na qual a martensita pode ser induzida mecanicamente) a fim de se obter a martensita induzida por tensão mecânica. Em seguida, a tensão é aliviada para que ocorra a reversão da martensita. Este processo é também repetido várias vezes, sempre da mesma forma. Neste caso, o treinamento é feito na região de temperatura onde ocorre a pseudo-elasticidade (pseudo-elasticidade será vista posteriormente). Em qualquer um dos casos, após um certo número de ciclos ou treinamento, o comportamento bidirecional aparece na amostra em consequência da formação e reversão de uma variante preferencial da martensita “treinada”. Esse comportamento bidirecional apareceria em consequência da geração de um padrão de campo de tensões ou defeitos (como consequência dos ciclos termomecânicos ou de treinamento) que favoreceria o crescimento e a reversão da variante preferencial da martensita durante os ciclos posteriores de aquecimento e resfriamento.

2.2 Efeito pseudo-elástico ou pseudo-elasticidade

Efeito pseudo-elástico ou *pseudo-elasticidade* se refere à capacidade de certos materiais recuperarem a forma original, após serem deformados muito além do limite elástico, quando o vínculo é removido (por exemplo, tensão de tração). Essa deformação recuperável pode chegar a 8% (NiTi) e acontece a temperatura constante. É um efeito elástico não linear presente na maioria das ligas que apresentam transformação martensítica termoelástica. Nessas ligas, se uma tensão mecânica é aplicada em uma temperatura entre M_I e M_D , portanto na fase austenítica, a martensita elástica pode ser induzida. Essa martensita induzida mecanicamente desaparece quando a tensão é removida. Esse comportamento poderia ser descrito como *efeito de memória de forma mecânica*. Uma curva típica de comportamento superelástico é mostrado na figura 2 (Schroeder, 1979). O gráfico apresenta dois platôs: o superior

3.2 Recuperação vinculada

Recuperação vinculada inclui aplicações na qual o elemento de memória é impedido de mudar de forma desenvolvendo portanto uma tensão mecânica. Como dito anteriormente, tem sido usado para acoplamento de tubos, conectores elétricos e abraçadeiras (Melton, 1990).

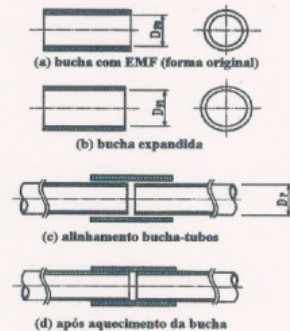


Figura 3 Representação de emendas de tubos utilizando bucha com EMF (Suzuki, 1992).

A figura 3 (Suzuki, 1992), apresenta esquematicamente a emenda de dois tubos via uso de uma bucha com EMF. A bucha é usinada com diâmetro interno D_{F0} (diâmetro memorizado, figura 3a) menor que o diâmetro externo D_p dos tubos a serem emendados e expandida mecanicamente para um diâmetro interno D_{F1} (figura 3b), tal que $D_{F1} > D_p$. Com os tubos alinhados e posicionados dentro da bucha (figura 3c), esta é aquecida acima de A_F selando a emenda (figura 3d). As ligas inoxidáveis desenvolvidas por este grupo (Otubo, 1995a, 1995b, 1996a, 1996b e 1996c) que apresentam recuperação de forma próxima de 4% serviriam muito bem para este tipo de aplicação que necessitam uma recuperação de forma de 2 a 3%.

3.3 Atuadores

Atuadores de memória de forma são utilizados em uma grande gama de aplicações pois, neste tipo de sistema existe movimento resultante da tensão aplicada e, portanto, trabalho mecânico pode ser realizado quando da recuperação da forma do elemento. São basicamente de dois tipos: aqueles ativados por aquecimento resistivo do elemento (*atuadores elétricos*) e aqueles ativados por mudança na temperatura ambiente (*atuadores térmicos*).

A figura 4 (Suzuki, 1990) mostra um exemplo de um *atuador elétrico*. É um diagrama esquemático de um micromanipulador de dois "dedos" feito com um fio de NiTi de 0,2 mm de diâmetro cujo estado memorizado é a forma circular. Sobre o fio é colocada uma camada de borracha silicone de modo que à baixa temperatura (na qual o fio de NiTi se

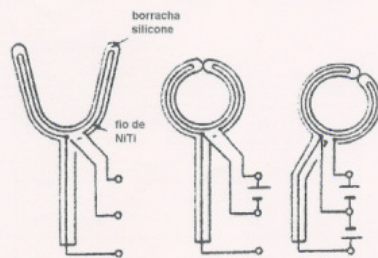


Figura 4. Representação esquemática de um micromanipulador feito de fio de NiTi (Suzuki, 1990).

encontra no estado martensítico de baixa resistência mecânica) obedece a forma imposta pela mesma que é a posição aberta. O aquecimento resistivo faz com que o fio passe para o estado austenítico, de maior resistência mecânica, superando a força contrária da camada de borracha e os "dedos" se fecham. A pressão que os "dedos" exercem pode ser controlada, dimensionando-se adequadamente a espessura da capa de borracha e o diâmetro do fio.

Como *atuadores térmicos*, vários exemplos podem ser citados: dispositivos para proteção contra incêndio, aparelhos para abertura de janelas, direcionador de ar para aparelhos de ar condicionado, válvula para controle de fluxo de óleo, etc.. Um exemplo de atuador térmico se encontra na área espacial. A figura 5 (Busch, 1992) mostra esquematicamente um dispositivo para liberação de painéis solares de satélite (a abertura dos painéis deve ocorrer uma vez o satélite em órbita e no método convencional isto é feito por explosivos). O dispositivo consta de um parafuso entalhado sobre o qual são montadas duas placas de modo que uma fique presa ao corpo do satélite e a outra ao painel. Ainda sobre o parafuso é montada uma bucha cilíndrica (feita de uma liga com memória de forma) no estado comprimido. Envolvendo a bucha se encontra um aquecedor elétrico. Todo o conjunto é preso por uma porca e, uma vez em órbita, o dispositivo de aquecimento é acionado, a bucha se expande

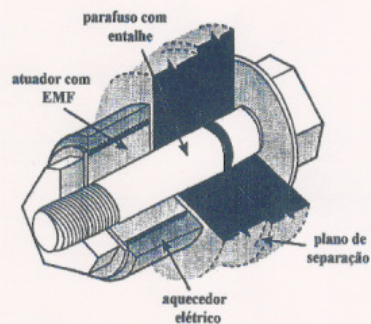


Figura 5. Dispositivo para liberação de painel solar atuado por uma bucha com EMF (Busch, 1992)

(estado ou forma memorizada) rompendo o parafuso na região entalhada e o painel é liberado. Para este tipo de aplicação é necessária uma recuperação de forma da ordem de 3%. Portanto, mais uma vez, as ligas inoxidáveis desenvolvidas por este grupo (Otubo, 1995a, 1995b, 1996a, 1996b e 1996c) poderiam ser candidatas para tal uso. Nesse sentido, está em andamento a viabilização de um projeto conjunto entre o IPEN, INPE, ITA e UNICAMP com o objetivo de desenvolver o dispositivo acima para satélites nacionais.

3.4 Pseudo-elasticidade

As ligas com EMF tem aplicações também nas áreas médica e odontológica com o uso do fenômeno da pseudo-elasticidade. Dentre as inúmeras ligas que apresentam pseudo-elasticidade, somente a liga de NiTi é utilizada em consequência de sua biocompatibilidade (Oshida, 1991 e Dutta, 1993). Um uso bastante conhecido é na ortodontia para a correção da arcada dentária (Burstone, 1985; Miura, 1986 e Humbeeck, 1992). A figura 6 mostra o fio já

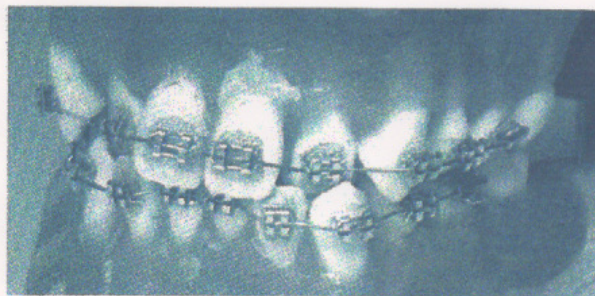


Figura 6. Fio ortodôntico após aplicação na arcada dentária (Furukawa, 1995)

adaptado sobre a arcada dentária (Furukawa, 1995). A grande vantagem desse fio, comparado ao tradicional feito em aço inoxidável, é a possibilidade de se ter alta deformação recuperável (até 8%) com baixa tensão mecânica. Para o paciente isto significa: menor tensão mecânica aplicada (portanto maior conforto), atuação com tensão constante por um longo período (menor número de idas ao ortodontista para a manutenção) e, o mais importante, diminuição no tempo total de tratamento. Outras aplicações que envolvem pseudo-elasticidade são: marcador de tumor em seios para posterior cirurgia, guia fio para catéteres, implantes para correção da escoliose, âncoras para suturas, haste de óculos, etc. (Humbeeck, 1992; Stoeckel, 1989 e Stoeckel, 1991).

4. CONCLUSÕES

Do exposto pode-se concluir que existe um número muito grande de aplicações com o uso das ligas que apresentam o fenômeno de Efeito de Memória de Forma. Obviamente as ligas devem ser adaptadas, ou melhor, elaboradas para cada tipo de aplicação tendo em mente parâmetros como as temperaturas de transformação, capacidade de recuperação de forma, tensão de recuperação de forma, tipo de ambiente a ser usado, biocompatibilidade (aplicações médicas), etc.

Este grupo vem trabalhando no desenvolvimento de ligas inoxidáveis (que ao nível mundial começou na década de 90) e também no desenvolvimento das ligas de NiTi com EMF visando tanto o caráter acadêmico bem como aplicações práticas estando aberto para possíveis interações.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de Recém-Doutor a um dos autores (J. Otubo)

Ao IPEN, INPE, ITA e UNICAMP pelo apoio ao Projeto: Desenvolvimento de dispositivo para liberação de painel solar de satélites com atuador de EMF.

A Villares Metais S.A. e em especial ao Eng. Celso Barbosa pela elaboração de amostras de ligas inoxidáveis com EMF e apoio a este projeto.

Ao Prof. Dr. Sérgio Frascino Müller de Almeida (ITA) e ao MSc. Antonio Claret Palerosi (INPE) pelo apoio no projeto mecânico do dispositivo de liberação de painel solar.

6. BIBLIOGRAFIA

Burstone, C. J., Qin, B. & Morton, J. Y.; Chinese NiTi wire - A new orthodontic alloy, *American Journal of Orthodontics*, 87, 445-452, 1985.

Busch, J. D., Purdy, W. E. & Johnson, A. D.; Development of a non-explosive device for aerospace applications, *26th Aerospace Mechanisms Symposium*, 1-16, 1992.

Dutta, R. S., Madangopal, K. Gadiyar, H. S. & Banerjee, S.; Biocompatibility of NiTi shape memory alloy, *British Corrosion Journal*, 28, 217-221, 1993.

Friend, C. M.; Have memory alloys been forgotten?, *Materials & Progress*, 7, 376-377, 1991.

Furukawa NT Alloys; catálogo, *The Furukawa Electric Co. Ltd.*, 1995.

Humbeeck, J. Van; From a seed to a need: The growth of the shape memory applications in Europe, *Material Research Society Proceedings*, 246, 377-387, 1992.

Jackson, C. M., Wagner, H. J. & Wasilewski, R. J.; 55-Nitinol - The alloy with memory: its physical metallurgy, properties, and applications, *NASA-SP 5110*, 1972.

- Melton, K. & Duerig, T.; Shape memory alloys for connectors and couplings, *Advanced Materials Technology International*, Ed. Greville e Brook, 165-166, 1990.
- Miura, F., Mogi, M., Ohura, Y. & Hamanaka, H.; The super-elastic property of the Japanese NiTi alloy wire for use in orthodontics, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 90, 1-10, 1986.
- Oshida, Y. & Miyazaki, S.; Corrosion and biocompatibility of shape memory alloys, *Corrosion Engineering*, 40, 1009-1025, 1991.
- Otubo, J.; Mei, P. R. & Koshimizu, S.; Desenvolvimento de aços inoxidáveis com efeito de memória de forma, *Anais do 50º Congresso Anual da ABM*, São Pedro, SP, 01 a 04 de agosto de 1995, 1, 15-27, 1995a.
- Otubo, J.; Mei, P. R. & Koshimizu, S.; Production and characterization of stainless steel based Fe-Cr-Ni-Mn-Si(-Co) shape memory alloys, *International Conference on Martensitic Transformation, ICOMAT'95*, Aug. 20 - Aug. 25, 1995, Lausanne, Switzerland e publicado no *Journal de Physique IV*, Colloque C8, 5, 427-432, 1995b.
- Otubo, J.; Mei, P. R. Koshimizu, S. & Martinez, L. G.; Ligas inoxidáveis com efeito de memória de forma: relação entre tratamento termomecânico, teor de martensita ϵ e dureza, *Anais do V Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável, Inox'96*, 20 a 22 de nov. de 1996, S. Paulo, S.P., 27-33, 1996a.
- Otubo, J.; Mei, P. R. Koshimizu, S. & Martinez, L. G.; Influência da temperatura de treinamento no efeito de memória de forma e na resistência mecânica da liga inoxidável Fe-Mn-Si-Cr-NiCo, *12º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, CBECIMAT*, 8 a 11 de dez. de 1996, Águas de Lindóia, S.P., 1996b.
- Otubo, J.; Desenvolvimento de ligas inoxidáveis com efeito de memória de forma: elaboração e caracterização, *Tese de Doutorado*, 19 de dez. de 1996, Faculdade de Engenharia Mecânica, Depto. de Engenharia de Materiais, UNICAMP, 1996c.
- Schroeder, T. A. & Wayman, C. M.; The formation of martensite and the mechanism of the shape memory effect in single crystal of Cu-Zn alloys, *Acta Metallurgica*, 25, 1375-1391, 1977a.
- Schroeder, T. A. & Wayman, C. M.; The two-way shape memory effect and other "training" phenomena in Cu-Zn single crystal, *Scripta Metallurgica*, 11, 225-250, 1977b.
- Schroeder, T. A. & Wayman, C. M.; Pseudoelastic effect in Cu-Zn single crystals, *Acta Metallurgica*, 27, 405-417, 1979.
- Stoeckel, D.; Fabrication and properties of Ni-Ti shape memory alloy wires, *Wire Journal International*, abril, 30-40, 1989.
- Stoeckel, D. & Yu, W.; Superelastic Ni-Ti wire, *Wire Journal International*, 24, 45-50, 1991.
- Suzuki, N., Ono, Y., Homma, H., Moriya, Y. & Morioka, Y.; Development of pipe fittings using stainless steel based shape memory alloy, *NKK Technical Review*, 66, 25-34, 1992.
- Suzuki, Y.; Shape memory alloy actuators, *Advanced Materials Technology International*, ed. Greville & Brook, 153-156, 1990.
- Wayman, C. M.; Phase transformations, nondiffusive", *Physical Metallurgy*, editores: R. W. Cahn e P. Haasen, North-Holland Physics Publishing, Parte II, cap. 15, 1983.