

# 1

## Introdução

O estudo de materiais inteligentes tem sido largamente explorado nas últimas décadas, em função de suas extraordinárias propriedades. Estes materiais, usualmente utilizados como sensores e atuadores nas chamadas estruturas inteligentes, têm a capacidade de alterar sua forma, rigidez, frequências naturais, dentre outras propriedades mecânicas, mediante a imposição de campos elétricos, eletromagnéticos, de temperatura ou de tensão. Atualmente, os materiais mais utilizados em aplicações envolvendo estruturas inteligentes são as ligas com memória de forma, as cerâmicas piezoelétricas, os materiais magneto-estrictivos e os fluidos reológicos (Rogers, 1995).

As ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys* – **SMA**s), objeto deste estudo, são ligas metálicas capazes de recuperar a geometria original (ou de desenvolver consideráveis forças de restituição ao se restringir sua recuperação) através da imposição de um campo de temperatura e/ou de tensão, devido a transformações de fase induzidas no material.

As **SMA**s apresentam uma série de comportamentos termomecânicos particulares. Os principais fenômenos associados à estas ligas são: a pseudoelasticidade; o efeito de memória de forma (*Shape Memory Effect* – **SME**); a transformação de fase devida à variação de temperatura e o efeito de memória de forma reversível (*Two-Way Shape Memory Effect* – **TWSME**). Estes fenômenos serão abordados em detalhes no Item 1.2.

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-lo de maneira adequada, permitindo explorar todo o seu potencial. A modelagem destas ligas possui duas abordagens distintas (Birman, 1997). A primeira, microscópica, tem um enfoque que leva em consideração aspectos metalúrgicos das ligas e foi tratada por Warlimont et al. (1974); Perkins (1975); Nishiyama (1978); Achenbach & Müller (1982); Sun & Hwang (1993a, b); Fischer & Tanaka (1992); Comstock et al. (1996); Lu & Weng

(1998); Levitas et al. (1998); Gall & Sehitoglu (1999); Sittner & Novák (2000), entre outros. A segunda abordagem, macroscópica, apresenta uma preocupação com os aspectos fenomenológicos. A seguir, faz-se uma breve discussão de alguns modelos macroscópicos encontrados na literatura.

Falk (1980, 1983) e Falk & Konopka (1990) propõem um modelo unidimensional baseado na teoria de Devonshire. Este modelo define uma energia livre na forma polinomial e descreve os comportamentos de pseudoelasticidade e memória de forma. A grande vantagem desse modelo é a sua simplicidade.

Há uma classe de modelos conhecida na literatura como modelos com cinética de transformação de fase assumida que consideram funções matemáticas (cossenoidais, exponenciais, ...) para descrever a cinética das transformações de fase. O primeiro modelo a apresentar esta formulação foi proposto por Tanaka & Nagaki (1982), tendo dado origem a outros modelos que apresentam alterações nas funções de cinética de transformação como o de Liang & Rogers (1990), Brinson (1993), Ivshin & Pence (1994a, b), Boyd & Lagoudas (1996), dentre outros. Pelo fato de seu uso ter se popularizado, estes modelos apresentam maiores comprovações experimentais, ocupando um importante espaço na modelagem do comportamento das ligas com memória de forma.

Alguns autores se propõem a explorar as idéias bem estabelecidas da teoria da elastoplasticidade (Simo & Taylor, 1986) para descrever as transformações de fase associadas às **SMA**s. Bertram (1982) propôs um modelo tridimensional utilizando conceitos de endurecimento cinemático e isotrópico. Mamiya e co-autores (Silva, 1995; Souza et al., 1998) também apresentam um modelo capaz de descrever os fenômenos de memória de forma e pseudoelasticidade utilizando os conceitos da plasticidade. Os trabalhos de Auricchio e co-autores (Auricchio & Lubliner, 1997) também podem ser enquadrados nessa idéia. Inicialmente proposto para um contexto unidimensional, o modelo foi posteriormente extrapolado para um contexto tridimensional (Auricchio et al., 1997; Auricchio & Sacco, 1997). Há, ainda, outros modelos que exploram conceitos utilizados pela plasticidade como Govindjee & Kasper (1997), Leclercq et al. (1995), dentre outros.

Knowles e colaboradores (Abeyaratne et al., 1994a, b) propuseram um modelo unidimensional que estabelece critérios para nucleação das fases para as variáveis internas baseados na barreira energética que deve ser superada para que

haja transformação de fase, além de leis de evolução baseadas na cinética de transformação entre as fases.

Fremond (1987, 1996) desenvolveu um modelo tridimensional que também representa os fenômenos de memória de forma e pseudoelasticidade, onde foram empregadas três variáveis internas que devem obedecer a restrições internas associadas à coexistência das diferentes fases do material.

Existem, ainda, outros modelos na literatura, dentre eles: Patoor e co-autores (Berveiller et al., 1991), Graesser & Cozzarelli (1994), Barret (1995), Buchheit & Wert (1996) e Huang & Brinson (1998).

Paiva (2000) discute alguns dos modelos acima mencionados apresentando uma análise crítica, indicando as vantagens e limitações de cada um deles. Dentre os modelos estudados, optou-se pelo desenvolvimento do modelo de Fremond (1987, 1996), devido à facilidade de inclusão de novas fases e restrições. Savi et al. (2002) e Baêta Neves et al. (2003) promoveram modificações no modelo original de Fremond, que permitiram a correta descrição de uma maior variedade de fenômenos apresentados pelas **SMA**s (além dos descritos pelo modelo original de Fremond). Esta escolha considerou o fato de que o novo modelo possui maior flexibilidade o que permite tratar diferentes carregamentos termomecânicos e a sua extensão para o método dos elementos finitos.

Este trabalho possui dois objetivos principais. O primeiro é reescrever o equacionamento para o modelo proposto por Savi et al. (2002) de forma consistente, incorporando as modificações propostas por Baêta Neves (2002) e a assimetria no comportamento tração-compressão. O segundo é promover a validação do modelo, comparando os resultados numéricos obtidos através do modelo com resultados experimentais encontrados na literatura para ensaios de tração a diversas temperaturas e para a assimetria no comportamento tração-compressão.

O modelo unidimensional desenvolvido considera quatro variantes de microconstituintes (austenita, martensita induzida por temperatura, martensita induzida por tensão trativa e martensita induzida por tensão compressiva) e diferentes propriedades para cada fase. O efeito das deformações induzidas por temperatura é incluído na formulação. O modelo contempla ainda o efeito das deformações plásticas e o acoplamento entre os fenômenos de plasticidade e transformação de fase, o que permite a descrição do fenômeno de memória de

forma reversível. Além disso, são introduzidas modificações na formulação que permitem o alargamento do laço de histerese da curva tensão-deformação, fornecendo resultados mais coerentes com dados experimentais. Por fim, incorpora-se a assimetria no comportamento tração-compressão, o que é um ponto relevante na correta descrição do comportamento termomecânico das **SMA**s.

## 1.1 Aspectos Metalúrgicos

Os aspectos metalúrgicos das ligas com memória de forma foram discutidos por Bain (1924), Matsumoto et al. (1987), Shaw & Kyriakides (1995), Otsuka & Ren (1999), Gall & Sehitoglu (1999), entre outros.

O fenômeno de transformações de fase é responsável pelas propriedades das **SMA**s. 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 (Wasilevski, 1975).

De fato, existem duas possíveis fases de microconstituintes associadas às **SMA**s: 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 (Funakubo, 1987) e sua estrutura depende do tipo de transformação sofrida pelo material (Otsuka & Ren, 1999; Wu & Lin, 2000). A martensita se apresenta sob a forma de placa conhecida como **CVP** (*Correspondence Variant Pair*), devido ao aparecimento de duas variantes geminadas (*twin related*).

Durante a transformação de fase da austenita em martensita maclada (*twinned*) ou induzida por temperatura, há uma mudança na geometria do cristal. Identifica-se, porém, um plano que não sofre distorção denominado plano invariante (*habit plane*). O processo de nucleação de cada **CVP** é iniciado através

do aparecimento de uma tensão de cisalhamento que atua numa direção paralela ao plano invariante mais favoravelmente orientado de cada cristal.

Durante o processo de transformação de fase induzida por tensão, podem-se destacar dois tipos de deformação distintas e que não ocorrem ao mesmo tempo. Pela ordem: deformação devida à nucleação da martensita (*CVP formation*) e deformação devido ao processo de reorientação (*CVP detwinning*). Em ensaios unidimensionais, durante o processo de reorientação, observa-se uma deformação significativa devido ao crescimento da variante que possui a orientação mais favorável em relação à direção do carregamento. Ao término desse processo, tem-se uma estrutura martensítica não-maclada (*detwinned*), chamada de fase produto.

A transformação martensítica cria uma forte dependência da orientação que influencia na assimetria do comportamento à tração e à compressão (Gall et al., 1999). Diversos trabalhos na literatura atestam a existência dessa assimetria para os principais tipos de **SMA**s independentemente de serem materiais mono ou policristalinos. Sittner e colaboradores verificaram esta assimetria para ligas mono (Sittner et al., 1998) e policristalinas (Sittner et al., 1999) do tipo Cu-Al-Zn-Mn. Nishimura et al. (1996, 1997), por sua vez, verificaram o fenômeno para ligas policristalinas à base de Ferro. Comstock et al. (1996) e Sittner & Novák (2000) também fizeram esta verificação para ligas policristalinas Ni-Ti, Ni-Al e ligas à base de Cobre. Liu et al. (1998) estudaram ligas policristalinas do tipo Ni-Ti, que também apresentam assimetria. Finalmente, Gall e colaboradores trataram a assimetria para ligas mono e policristalinas do tipo Ni-Ti (Gall & Sehitoglu, 1999; Gall et al. 1999 e Gall et al. 2001).

Em função da forte dependência da orientação (no caso de monocristais) e da textura (no caso de policristais), na maioria dos casos, o material sob compressão apresenta no diagrama tensão-deformação uma maior tensão crítica para transformação de fase, maior inclinação durante o trecho de transformação de fase e menores níveis de deformação residual, quando comparado com o comportamento à tração.

As ligas à base de Níquel-Titânio (*Nitinol*) oferecem excepcionais propriedades físicas e mecânicas, além de excelente biocompatibilidade, e por isso têm sido as mais utilizadas em diversas aplicações. O processo de obtenção dessas ligas pode ser um fator complicador para o entendimento do comportamento de policristais, pois em geral proporcionam estruturas cristalinas de texturas

crystallographic very complex. Another factor of great influence with respect to chemical composition, since small changes in the equiatomic proportion between Nickel and Titanium can generate precipitates ( $Ti_3Ni_4$ ) that are not capable of undergoing martensitic transformations, acting as obstacles to the movement of dislocations.

## 1.2 Principais Comportamentos Termomecânicos

### 1.2.1 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 ( $A$ ). A Figura 1.1 apresenta o fenômeno de transformação de fase devida à variação de temperatura. Partindo do ponto **A**, com o decréscimo da temperatura, a estrutura cristalina experimenta uma transformação de fase martensítica  $A \Rightarrow M$  (trecho **AB**). Este processo se inicia em  $T = M_S$  (ponto **A**) e se desenvolve até que a temperatura  $T = M_f$  (ponto **B**), abaixo da qual a martensita ( $M$ ) é estável, seja atingida. Elevando-se a temperatura, a partir do ponto **B**, ao atingir  $A_S$  (ponto **C**), observa-se uma transformação de fase inversa  $M \Rightarrow A$  (trecho **CD**), que persiste até que a temperatura  $A_f$  seja alcançada (ponto **D**).

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 relacionado aos trechos de transformação de fase. A área compreendida por este laço representa a energia dissipada durante o processo.

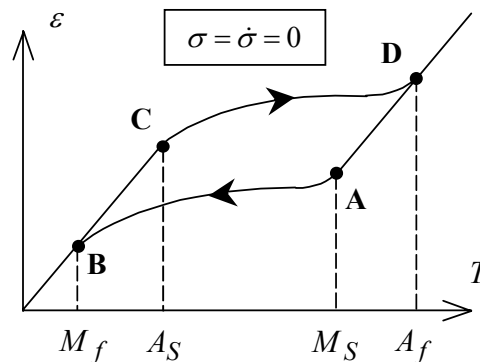


Figura 1.1 – Fenômeno de transformação de fase devida à variação de temperatura.

As temperaturas para início e fim de transformação de fase são obtidas a partir do termograma **DSC** (*Differential Scanner Calorimeter*) que apresenta a

evolução do fluxo de calor em função da temperatura. Para tanto, utiliza-se o processo adotado por Shaw & Kyriakides, (1995) em seu trabalho para identificação das diversas temperaturas, conforme a Figura 1.2.

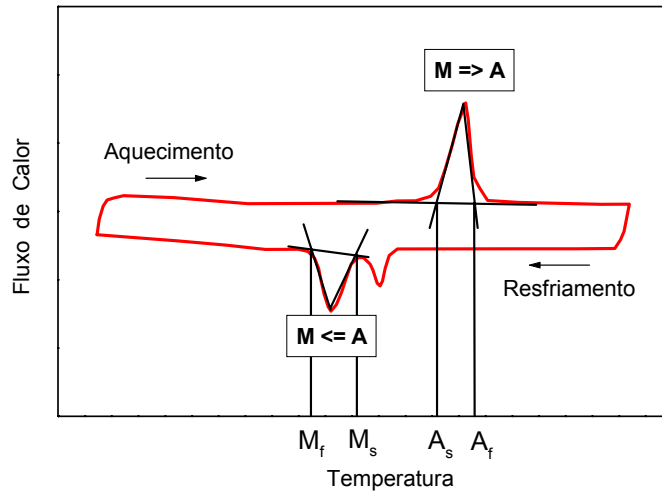


Figura 1.2 – Termograma **DSC** esquemático para uma liga **SMA**.



## 1.2.2 Pseudoelasticidade

Considere agora uma amostra a uma temperatura superior a  $A_f$ . Nesta situação, a fase austenítica ( $A$ ) é estável. De acordo com a Figura 1.3, para uma temperatura constante  $T > A_f$ , com a aplicação de um carregamento mecânico, o material se comporta elasticamente até que uma tensão crítica  $\sigma^{CRIT}$  seja alcançada (ponto **A**), quando, então, dá-se início uma transformação de fase  $A \Rightarrow M^+$  (trecho **AB**). Esta martensita induzida por tensão apresenta no ponto **B** apenas uma variante associada à tração ( $M^+$ ). Ao descarregar a amostra, o material experimenta uma transformação inversa  $M^+ \Rightarrow A$  (trecho **CD**), já que para  $T > A_f$  a martensita é uma fase instável fora da presença de um campo de tensões.

É importante destacar, mais uma vez, o aparecimento de um laço de histerese (região compreendida entre os pontos **A**, **B**, **C** e **D**). Vale ressaltar que existe um limite à recuperação dessas deformações representado pelo limite elástico da fase produto obtida após a transformação, a partir de onde o material passa a se comportar plasticamente e a deformação não mais pode ser recuperada.

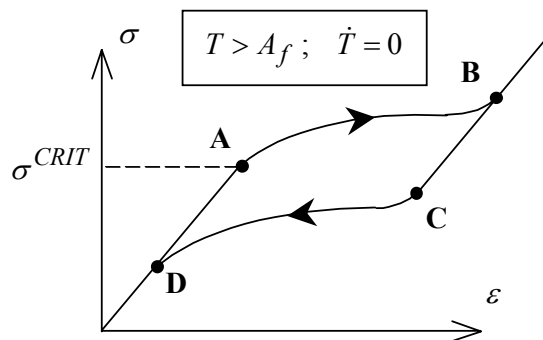


Figura 1.3 – Fenômeno de pseudoelasticidade.

### 1.2.3 Efeito de Memória de Forma (SME)

Considere uma amostra com uma estrutura martensítica ( $M$ ), obtida a partir do resfriamento de uma amostra a uma temperatura inferior a  $M_f$ . Com a aplicação de um carregamento, tem-se uma resposta elástica até que uma tensão crítica  $\sigma^{CRIT}$  seja alcançada (ponto **A**), dando início a um processo de reorientação da martensita resultando em uma única variante martensítica associada à tração ( $M^+$ ). Durante este processo de reorientação  $M \Rightarrow M^+$ , a tensão não se desenvolve muito em comparação com a deformação alcançada (trecho **AB**). A partir do ponto **B**, a liga volta a apresentar um comportamento elástico. Ao descarregar a amostra, não há uma nova conversão em diversas variantes, pois esta única variante resultante é termodinamicamente estável para  $T < M_f$ , havendo apenas uma pequena recuperação elástica.

Para retornar à geometria original do corpo, é necessário aquecê-lo a uma temperatura superior a  $A_f$  e resfriá-lo à temperatura inicial abaixo de  $M_f$ , promovendo, assim, a recuperação da deformação residual  $\varepsilon_R^T$ . Na prática, a diferença entre a geometria obtida acima de  $A_f$  e abaixo de  $M_f$  é insignificante, pois a deformação induzida durante o resfriamento é ordens de grandeza menor que a deformação  $\varepsilon_R^T$  induzida por tensão e recuperada durante o aquecimento.

A Figura 1.4 mostra a curva tensão-deformação para este ensaio.

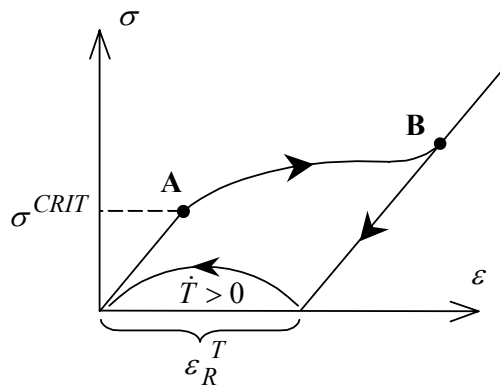


Figura 1.4 – Efeito de Memória de Forma.

#### 1.2.4 Efeito de Memória de Forma Reversível (TWSME)

O efeito de memória de forma reversível é obtido após submeter a **SMA** a um processo de treinamento (Zhang *et al.*, 1997; Miller & Lagoudas, 2000) que permite associar uma forma a cada fase, em função da variação de temperatura.

Existem dois processos de treinamento para ligas com memória de forma denominados ciclos de **SME** (*Shape Memory Effect Cycling*) e treinamento através de ciclos pseudoelásticos (*Stress-Induced Martensite Training – SIMT*).

O processo de ciclos de **SME** é baseado no processo de plastificação da martensita após o processo de reorientação e consiste na aplicação de um carregamento até que o limite de escoamento da fase produto seja superado para temperatura constante e  $T < M_f$ . Por outro lado, o processo de treinamento **SIMT** é obtido a partir do fenômeno de pseudoelasticidade (para  $T > A_f$ ) e também consiste em carregar o material acima do limite de escoamento da fase produto.

Os dois processos de treinamento pressupõem deformações plásticas consideráveis. Existe um limite para a deformação plástica imposta ao material, assim como um determinado número de ciclos para que o material apresente este comportamento. Resultados experimentais mostram que para uma liga *Nitinol* policristalina, a deformação total imposta ao material deve estar entre dez e vinte por cento e o número de ciclos para “treinar” o material em torno de vinte.

### **1.3 Aplicações**

Machado (2002) apresenta uma revisão bibliográfica das principais aplicações envolvendo **SMA**s nas diversas áreas do conhecimento. As aplicações aqui relacionadas foram retiradas deste trabalho.

#### **1.3.1 Aplicações Médicas e Odontológicas**

Devido às singulares características, dentre elas sua excelente biocompatibilidade, as ligas com memória de forma têm instigado uma série de pesquisas em diversos campos da medicina (Machado & Savi, 2003) e da odontologia (Machado & Savi, 2002). Dentre as inúmeras aplicações nestas áreas, algumas delas são destacadas a seguir.

Tratamentos cardiovasculares utilizam atualmente uma gama de dispositivos que utilizam **SMA**. O primeiro dispositivo com memória de forma foi o filtro de Simon (Ryhänen, 1999), que tem como função filtrar os coágulos que percorrem a corrente sanguínea. Os coágulos são aprisionados no filtro, sendo dissolvidos com o passar do tempo (Duerig et al., 1999). Para inserção do filtro na corrente sanguínea, ele é deformado, a partir de sua forma original no estado martensítico, conforme a Figura 1.5(a), e colocado na ponta do cateter. Uma solução salina que flui através do cateter promove o resfriamento do filtro, enquanto ele é posicionado no interior do corpo humano. Quando o filtro é lançado do cateter, o fluxo da solução salina é interrompido e o aquecimento pela corrente sanguínea promove a recuperação de sua forma original. Este procedimento pode ser acompanhado pela Figura 1.5(b) (Duerig et al., 1999).

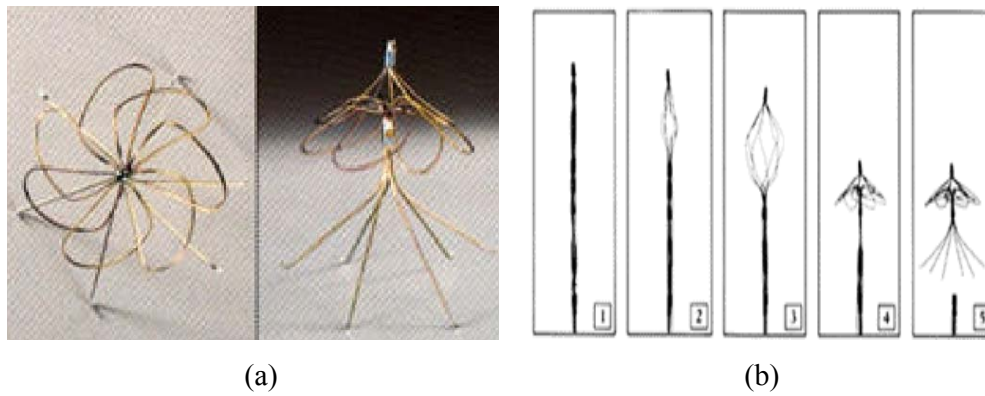


Figura 1.5 – Filtro de Simon.

(a) Filtro de Simon na forma aberta;

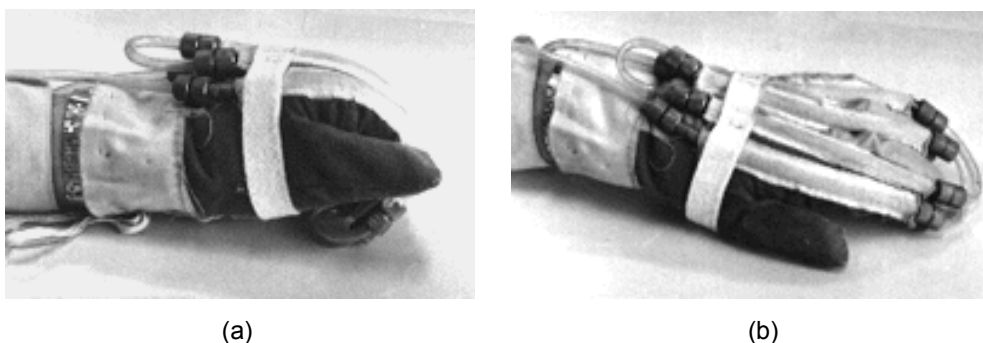
(b) Seqüência de lançamento do filtro.

Os chamados dispositivos auto-expansivos, também conhecidos como “*stents*” em homenagem ao dentista C. T. Stent, constituem outra importante aplicação cardiovascular. Estes dispositivos são utilizados para sustentar o diâmetro interno de vasos tubulares como vasos sanguíneos (Duerig et al., 1999), esôfago e duto biliar (Devicelink, 2001). Neste tipo de aplicação, uma trama cilíndrica com memória de forma, conforme Figura 1.6, é inserida e posicionada por meio de um cateter em um vaso sanguíneo, por exemplo. Inicialmente, esta trama é pré-comprimida e encontra-se em seu estado martensítico. Conforme a trama é aquecida devido à temperatura do corpo, ela tende a recuperar a sua forma original, expandindo-se. Além de procedimentos como o de angioplastia, para evitar o re-entupimento de um vaso, estes dispositivos também podem ser utilizados no tratamento de aneurismas cerebrais, para a sustentação das paredes de um vaso enfraquecido (Duerig et al., 1999).



Figura 1.6 – Dispositivos auto-expansivos com memória de forma.

A ortopedia também tem explorado as propriedades das **SMA**s como por exemplo em luvas destinadas à fisioterapia constituídas de fios com memória de forma na região dos dedos, que possuem a função de reproduzir a atuação dos músculos da mão, permitindo que ela se abra e se feche. O efeito de memória de forma reversível é explorado nessa situação, de tal forma que, quando a luva é aquecida, os fios se contraem fechando a mão, conforme Figura 1.7(a). Quando a luva é resfriada, os fios retornam à posição inicial, abrindo a mão, conforme Figura 1.7(b). A alternância destas condições, é responsável pelo exercício da musculatura.



(a)

(b)

Figura 1.7 – Luva com memória de forma.

(a) Posição da luva em alta temperatura;

(b) Posição da luva em baixa temperatura.

Outra área de aplicação das **SMA**s é a odontologia, onde são empregadas em aparelhos ortodônticos, limas endodônticas, grampos para consolidação de fissuras na arcada, entre outras aplicações.

A utilização de aparelhos ortodônticos com memória de forma (Figuras 1.8a e 1.8b) se iniciou no ano de 1972, causando um impacto significativo na ortodontia. Os aparelhos com memória de forma exploram a pseudoelasticidade, podendo fornecer uma força de restituição uniforme e praticamente constante. As **SMA**s apresentam, durante os trechos de transformação de fase, elevados índices de deformação para uma pequena variação da tensão. Assim, o uso das **SMA**s em aparelhos ortodônticos elimina a necessidade de repetidos apertos, acelerando o processo corretivo. Esses aparelhos proporcionam um maior conforto aos pacientes durante a instalação e também no processo corretivo (Mantovani, 2000).

Duerig et al. (1996) estimam que cerca de trinta por cento dos aparelhos ortodônticos atuais sejam constituídos de ligas com memória de forma.

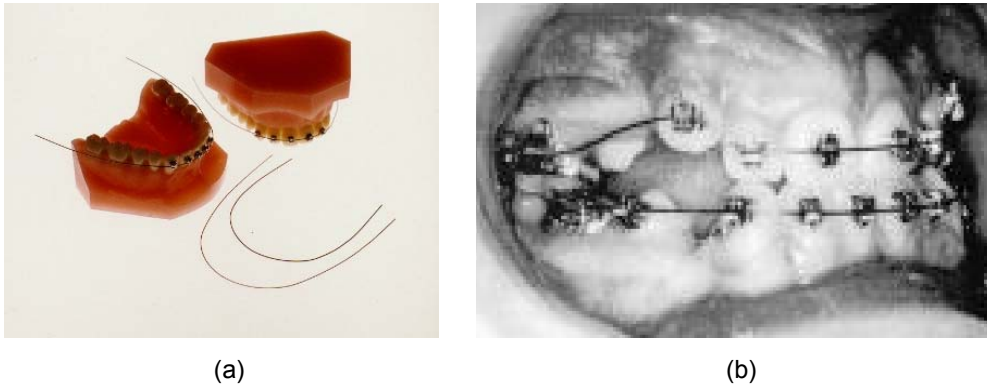


Figura 1.8 – Aparelhos ortodônticos com fios de memória de forma.

### 1.3.2 Atuadores com Memória de Forma

Atuadores convencionais tais como motores hidráulicos e pneumáticos promovem grandes perdas de energia, têm um grande volume e pesadas massas para o sistema de atuação. Novas tecnologias e materiais estão atraindo atenção para que se desenvolvam sistemas mais leves e com grande poder de atuação (Mavroidis, 2002).

Um tipo comum de atuador com memória de forma consiste em colocar uma mola de **SMA** balanceada contra uma mola de material convencional de modo que quando o dispositivo é aquecido, a mola de **SMA** vence a resistência da mola convencional, empurrando o pistão em uma direção. Por outro lado, quando o dispositivo é resfriado, a mola com memória de forma sofre uma transformação de fase, sendo comprimida pela ação da mola convencional, o que empurra o pistão na direção oposta (Hodgson & Brown, 2000). Este tipo de atuador é apresentado esquematicamente na Figura 1.9 e tem inspirado um grande número de aplicações.

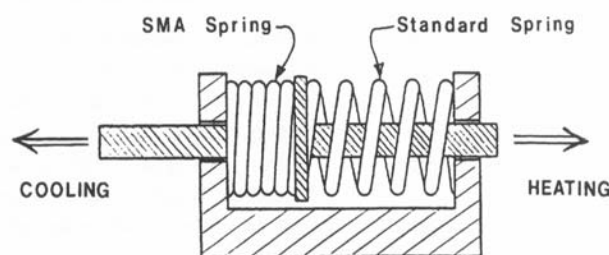


Figura 1.9 – Representação esquemática de um atuador com memória de forma.

As ligas com memória de forma também encontram aplicações como atuadores no universo dos micro-sistemas eletromecânicos. Existem vários exemplos de micro-atuadores com memória de forma, tais como a micro-garra apresentada nas Figuras 1.10(a) e 1.10(b) que auxilia na montagem de micro-sistemas óticos, pinçando micro-lentes com um diâmetro que pode ser menor do que 0,35 mm. Nas figuras, observa-se um modelo de micro-garra que é construída por uma peça única, onde a maior dimensão possui 1,5 mm, e sua atuação é devida ao efeito de memória de forma reversível. O aquecimento da peça é feito por um dispositivo termoelétrico ou por efeito Joule.



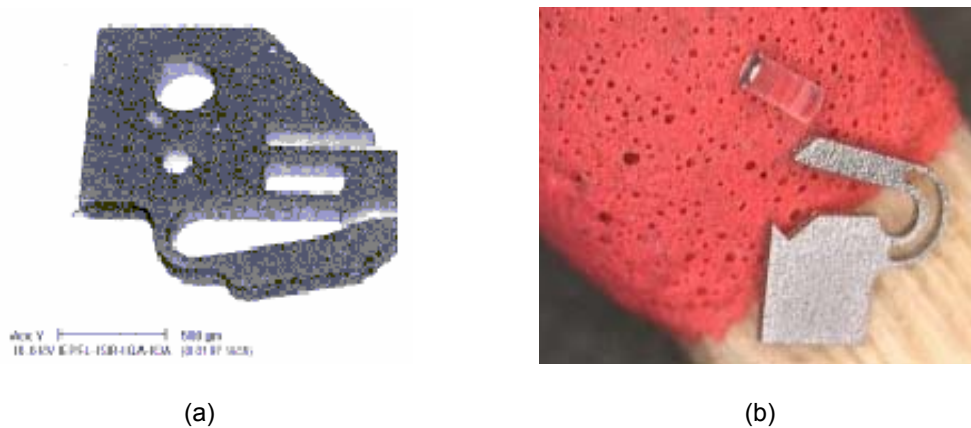
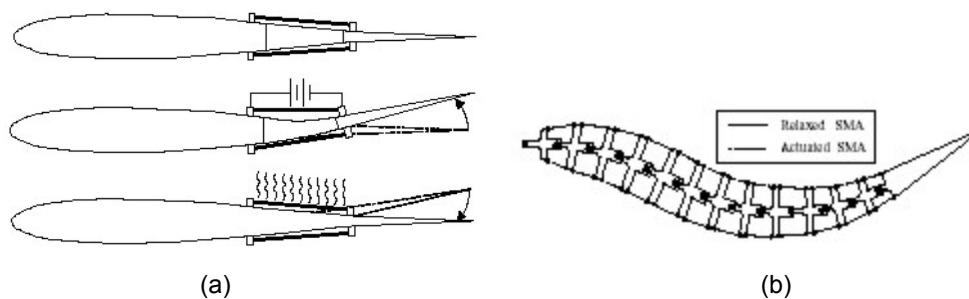


Figura 1.10 – Micro-garra com memória de forma reversível.

(a) Micro-garra na posição fechada;

(b) Micro-garra na posição aberta (comparada com a cabeça de um palito de fósforo).

A indústria naval também tem utilizado protótipos de estruturas flexíveis inteligentes atuadas por ligas com memória de forma. Lagoudas et al. (1999) desenvolveram um protótipo de um hidrofólio flexível atuado por fios com memória de forma, tentando simular a dinâmica de natação da cauda de peixes com o estudo da propulsão hidrodinâmica. Os fios são aquecidos pela passagem de uma fonte de corrente elétrica externa. A Figura 1.11(a) apresenta o esquema de operação de um hidrofólio com apenas um atuador. Primeiramente, o hidrofólio encontra-se numa posição neutra, sem atuação. Depois, o atuador da parte superior é aquecido, encurtando o seu tamanho e puxando para cima a parte traseira do hidrofólio. Por último, quando o atuador esfria, a parte traseira volta para a posição de neutralidade. A Figura 1.11(b) apresenta o esquema de um hidrofólio com múltipla atuação. A Figura 1.11(c) apresenta uma foto do protótipo do hidrofólio em um túnel de água.





(c)

Figura 1.11 – Hidrofólio.

(a) Esquema de operação do hidrofólio;

(b) Esquema do hidrofólio em atuação;

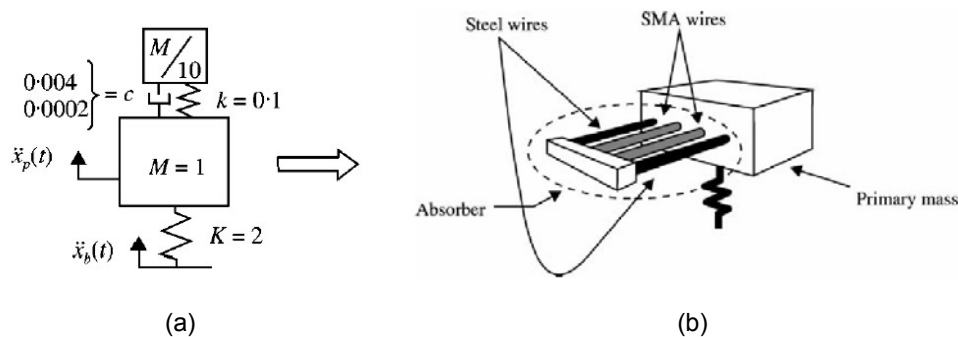
(c) Protótipo do hidrofólio em um túnel de água.

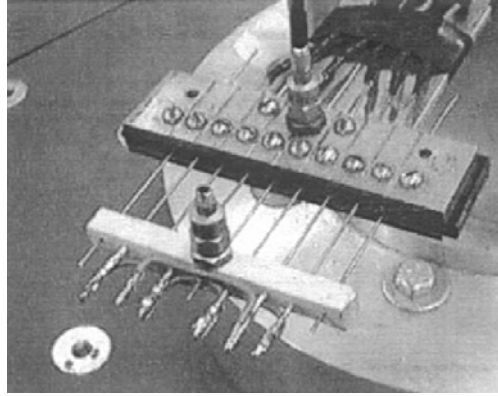
### 1.3.3 Controle de Vibrações

O controle de vibrações é um campo de estudo bastante relevante dentro da engenharia mecânica cujo principal objetivo reside na atenuação das vibrações de um sistema primário. As ligas com memória de forma têm sido utilizadas para o controle passivo de estruturas devido à sua alta capacidade de amortecimento, consequência de seu comportamento histerético relacionado com as transformações de fase sofridas pelo material. Uma característica importante desse comportamento é que o amortecimento aumenta conforme a amplitude da vibração aumenta (Van Humbeeck, 1999).

Um dispositivo de controle passivo clássico é conhecido como **TVA** – “*Tuned Vibration Absorber*” que consiste em um segundo oscilador montado no sistema primário, excitado por uma força harmônica externa. Ajustando-se a frequência natural do **TVA** com a frequência de excitação do sistema primário ele irá atenuar a vibração da massa do sistema primário. O conceito do dispositivo **TVA** está apresentado na Figura 1.12(a).

Williams et al. (2002) apresentam um dispositivo **TVA** adaptativo (**ATVA**) com elementos de memória de forma (Figura 1.12b). Este tipo de controle é recomendado em sistemas onde a frequência varia ou é incerta. O **ATVA** com memória de forma possui a capacidade de alterar a sua rigidez de acordo com a temperatura em que os elementos com memória se encontram. Esta propriedade faz com que o **ATVA** com memória de forma possa atenuar as vibrações do sistema primário através de uma faixa de frequências apenas alterando-se a temperatura dos elementos elásticos com memória.





(c)

Figura 1.12 – Absorvedores mecânicos.

(a) Esquema para absorvedor **TVA**;

(b) Conceito de projeto do absorvedor **ATVA**;

(c) Protótipo do absorvedor **ATVA**.

### 1.3.4 Acoplamentos

Em 1970, a indústria militar aeronáutica americana colocou em uso com sucesso um acoplamento com memória de forma do tipo *CryOfit* (Figura 1.13) em um avião de guerra F-14, promovido pela *Raychem*.

A instalação do acoplamento de **SMA** não é tão simples. Inicialmente, o acoplamento é imerso em nitrogênio líquido ( $\cong -196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), o seu diâmetro é alargado mecanicamente, permanecendo no nitrogênio líquido até a sua montagem no sistema hidráulico. Ele é rapidamente montado nas extremidades das tubulações metálicas que serão unidas. Voltando à temperatura ambiente, ele tende a recuperar o seu menor diâmetro apertando os tubos com uma grande força. Isto cria uma junta que na maioria dos casos é equivalente ou superior as juntas soldadas (Hodgson & Brown, 2000).

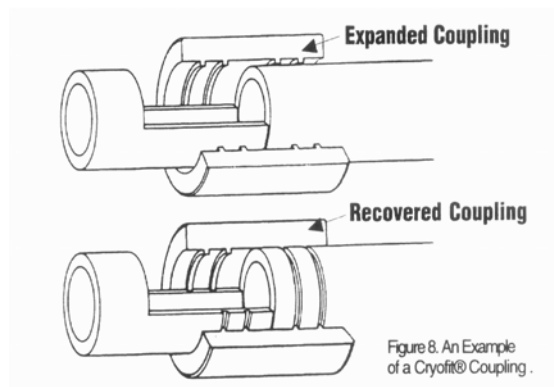


Figura 1.13 – Acoplamento do tipo *CryOFit* (Hodgson & Brown, 2000).

## 1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo, é feita uma introdução envolvendo uma revisão bibliográfica sobre as ligas com memória de forma, faz-se um posicionamento do trabalho na literatura e estabelecem-se os seus objetivos. Há, ainda, três itens que complementam a revisão bibliográfica do assunto, falando de aspectos metalúrgicos inerentes às **SMA**s, seus principais comportamentos termomecânicos e aplicações envolvendo este tipo de material.

No segundo capítulo, inicialmente, é feita uma revisão da formulação constitutiva que segue o formalismo adotado para *Materiais Padrão Generalizados*. Em seguida, é apresentado o modelo constitutivo desenvolvido, considerando os efeitos de deformações plásticas e a assimetria no comportamento tração-compressão. Depois, faz-se uma breve discussão dos algoritmos empregados para a solução numérica das equações do modelo. Encerrando o capítulo, são conduzidos ensaios numéricos variando isoladamente as diversas propriedades que foram desdobradas para tração e compressão, visando a análise da sensibilidade desses parâmetros.

O terceiro capítulo está dividido em duas partes distintas. Na primeira, é feito um ajuste quantitativo entre os resultados numéricos obtidos e resultados experimentais encontrados na literatura para ensaios de tração a diversas temperaturas. Na segunda parte, são mostrados os resultados numéricos obtidos pelo modelo para os principais fenômenos associados às ligas com memória de forma, atestando a habilidade do modelo em descrevê-los.

O quarto capítulo destina-se a explorar e discutir os resultados obtidos para a assimetria tração-compressão. Faz-se um ajuste quantitativo entre os resultados numéricos obtidos pelo modelo e resultados experimentais encontrados na literatura, para validação das modificações introduzidas no modelo.

O quinto e último capítulo é destinado a conclusões e sugestões para trabalhos futuros.