

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**Edcarlos Antônio Nunes Coura**

**Estudo da Aplicação da Liga NiTi com Efeito Memória de  
Forma em Atuadores de Aeronaves**

2016

# **Estudo da Aplicação da Liga NiTi com Efeito Memória de Forma em Atuadores de Aeronaves**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Cimini Jr.

Coorientador: Prof. Dr. Leandro de Arruda Santos

**Belo Horizonte**

**2016**

C858e

Coura, Edcarlos Antônio Nunes.

Estudo da aplicação da liga NiTi com efeito memória de forma em atuadores de aeronaves [manuscrito] / Edcarlos Antônio Nunes Coura. – 2016.

xv, 76 f., enc.: il.

Orientador: Carlos Alberto Cimini Jr.

Coorientador: Leandro de Arruda Santos.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 72-76.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Modelos e construção de modelos - Teses. 3. Simulação (Computadores) - Teses. 4. Efeito de memória de forma - Teses. 4. Ligas com efeito de memória - Teses. I. Cimini Júnior, Carlos Alberto. II. Santos, Leandro de Arruda. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

## **Estudo da Aplicação da Liga NiTi com Efeito Memória de Forma em Atuadores de Aeronaves**

**Edcarlos Antônio Nunes Coura**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Comissão avaliadora:

---

Prof. Dr. Carlos Alberto Cimini Jr.  
DEES-UFMG –(Orientador)

---

Prof. Dr. Leandro de Arruda Santos  
DEMET-UFMG –(Coorientador)

---

Prof. Dr. Estevam Barbosa de Las Casas  
DEES-UFMG

---

Dr. Osmar de Sousa Santos  
Pós-Doutorado – ITA

Belo Horizonte, 17 de junho de 2016

# DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha família, namorada e amigos.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo o que eu vivi e que me possibilitou chegar até aqui e me tornar tudo o que eu sou.

À minha mãe, Edneia Gonçalves Nunes e irmão, Rafael Antônio Nunes Coura e Josenea Aparecida Nunes Coura pelo apoio, compreensão, paciência e incentivo na mudança e na realização deste trabalho.

A minha namorada Bruna Guedes Alvarenga que sempre me deu força e acreditou em mim até nas horas mais difíceis. Obrigado por tudo!

Aos professores Dr. Carlos Alberto Cimini Jr e Dr. Leandro dos Santos Arruda pela confiança, dedicação, orientação e oportunidade de crescimento.

A meu grande amigo Pedro Henrique Almeida pela ajuda na concretização do trabalho.

Aos amigos do mestrado, Danilo Bento, Juliano Becho, Lucas Grilo e Leandro Silva pela paciência, ajuda, explicações e apoio durante o período do mestrado.

Aos funcionários da PROPEEs da UFMG que contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos os professores da PROPEEs por compartilharem seus conhecimentos.

Aos membros da banca pela disponibilidade e contribuição com o meu trabalho.

A PROPEEs pela infraestrutura e pelo apoio.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

Enfim, a todas as pessoas que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O presente trabalho aborda um estudo computacional da aplicação de fios de liga de memória de forma (LMF), NiTi, como atuadores de aeronave, mais especificamente para mover uma das superfícies de comando da aeronave, o *flap*. O estudo computacional subsidiou a construção de um modelo do atuador. As Ligas de Memória Forma são materiais que possuem um comportamento termomecânico peculiar, pois possuem a propriedade de recuperar sua forma original depois de sofrer grande deformação mecânica. Esta propriedade está relacionada com a transformação de fase entre as fases austenita e martensita que ocorre na liga. Por este motivo, a liga apresenta comportamento constitutivo não linear, fazendo-se necessário o uso de um modelo constitutivo desenvolvido para este material. O modelo constitutivo foi implementado como uma sub-rotina UMAT dentro da plataforma ABAQUS para que possa ser usado em conjunto com o programa de elementos finitos. A sub-rotina UMAT usada no desenvolvimento deste trabalho foi a SMA\_UM, que implementa três dos vários modelos constitutivos desenvolvidos para as Ligas de Memória Forma. Para avaliar a resposta obtida pela sub-rotina utilizada se fez necessária sua validação, através de simulações do ensaio de tração dos fios no programa de elementos finitos ABAQUS. Além de validar a sub-rotina, estas simulações foram analisadas a fim de avaliar qual dos modelos constitutivos é o mais adequado para ser usado nas demais etapas do projeto. A partir do modelo constitutivo definido como o mais adequado, foi desenvolvido um modelo preliminar do atuador de liga de memória de forma e avaliou-se alguns parâmetros como tensão gerada, quantidade de movimento do atuador e a deformação recuperada. Outro modelo baseado na asa de um aeromodelo também foi desenvolvido, variando-se a deformação inicial e relacionando-se esta com a tensão gerada e a quantidade de giro obtida durante o acionamento. Com base nestas análises foi possível concluir que a liga de memória de forma pode gerar grande tensão no sistema de atuação e que a deformação inicial dos fios influencia diretamente na tensão e no movimento do atuador.

## ABSTRACT

This work describes a computational study of the application of shape memory alloy wires (SMA), NiTi, as aircraft actuators, specifically to move one of the aircraft control surfaces, the *flap*. The computational study aimed to build a model of the actuator. The shape memory alloys are materials that have a peculiar thermo mechanical behavior, as they have the property to recover its original shape after undergoing large mechanical deformation. This property is related to the phase transformation, between austenite and martensite phases, which occurs in the alloy. For this reason the alloy has nonlinear constitutive behavior, making it necessary to use a constitutive model developed for this material. The constitutive model was implemented as a UMAT subroutine so that it can be used together with finite element program ABAQUS. The UMAT subroutine used in this work is the SMA\_UM, implementing three different constitutive models developed for Shape Memory Alloys. To evaluate the response obtained by the subroutine was made necessary their validation by comparing the result of the tensile test with simulated by ABAQUS program. In addition to validating the subroutine, these simulations were analyzed to assess which of the constitutive models was the most suitable for use in other stages of the project. From the constitutive model defined as the most suitable a preliminary model actuator of shape memory alloy was developed and some parameters evaluated such as stresses, the amount of actuator movement and recovered deformation. Another model based on a model airplane wing has also been developed, varying the initial deformation and relating this to the generated voltage and the amount of rotation obtained during the drive. Based on this analysis it was concluded that the shape memory alloy can generate great stress in the system of acting and the initial deformation of the wire directly influences the stress and movement of the actuator.

# SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS .....	iv
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1 Justificativa .....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo Principal.....	3
1.2.2 Objetivos específicos .....	3
2. Revisão bibliográfica.....	4
2.1 Ligas de Memória de Forma .....	4
2.1.1 Efeito memória de Forma .....	9
2.1.2 Superelasticidade .....	12
2.1.3 Aplicações das LMF.....	14
2.1.4 Modelo Constitutivo de Ligas de Memória de Forma.....	16
2.2 Atuadores .....	23
2.2.1 Atuadores de materiais inteligentes .....	25
3. Metodologia .....	29
3.1 Projeto do atuador .....	29
3.2 Caracterização da Liga de Memória de Forma .....	36
3.3 Análises numéricas .....	39
3.4 Modelos Numéricos .....	43
3.4.1 Validação .....	43
3.4.2 Modelo preliminar do atuador .....	45
4. Resultados e Discussões.....	49
4.1 Caracterização do Material .....	49
4.2 Validação .....	53
4.3 Resultados das Análises Numéricas do Atuador Preliminar .....	55

4.4	Modelo Baseado no Perfil da Asa de Um Aeromodelo.....	63
5.	Conclusões e sugestão de trabalhos futuros .....	69
5.1	Conclusões .....	69
5.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros .....	70
6.	Referências bibliográficas .....	72

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema da transformação martensítica. Adaptado de OTSUKA E WAYMAN (1998).....	5
Figura 2.2 – Representação dos tipos de deformação invariante na transformação martensítica. (a) mudança de forma da transformação martensítica. (b) acomodação da deformação por escorregamento. (c) acomodação da deformação por maclação. Adaptado de OTSUKA E WAYMAN (1998).....	7
Figura 2.3 – Representação esquemática do processo de movimento do contorno de macla pela aplicação de tensão na martensita. (a) estado indeformado; (b) acomodação de maclas e formação de maclas compostas; (c) reorientação da martensita; (d) reorientação adicional e demaclação da martensita; (e) processo de demaclação; (f) geração de deslocamentos adicionais pela deformação. Adaptado de LIU et al. (1999).....	8
Figura 2.4 – Temperaturas de transformação em função da fração volumétrica martensítica. Adaptado de CHOPRA (2002).....	9
Figura 2.5 – Representação do EMF. (a) martensita maclada. (b) processo de demaclação da martensita sob tensão. (c) martensita demaclada livre de tensão. (d) recuperação da forma original. Adaptado de BRINSON (1993).....	10
Figura 2.6 – Transformação de fase no EMF. Adaptado de CHOPRA (2002).....	11
Figura 2.7 – Comportamento mecânico típico do EMF. Adaptado de CHOPRA (2002).....	12
Figura 2.8 – Transformação de fase no SE. Adaptado de CHOPRA (2002).....	13
Figura 2.9 – Comportamento mecânico típico do SE. Adaptado de (CHOPRA, 2002).....	13
Figura 2.10 – Acoplador de tubos de LMF. Adaptado de FUNAKUBO E KENNEDY (1987).....	15
Figura 2.11 – Exemplo de aplicação da LMF. Adaptado de FUNAKUBO E KENNEDY (1987).....	16
Figura 2.12 – Temperatura de transformação <i>versus</i> tensão. Adaptado de LIANG E ROGERS (1990).....	20
Figura 2.13 – Relação da tensão crítica com a temperatura para o modelo constitutivo de Brinson (BRINSON, 1993).....	22
Figura 2.14 – Configurações dos atuadores de LMF. Adaptado de HUANG (2002).....	26

Figura 2.15 – LMF ( <i>Shape Memory Alloy</i> – SMA) usada na redução de ruído da turbina (HARTL et al., 2010).....	28
Figura 3.1 – Seção transversal da asa, a qual o modelo preliminar do atuador é baseado. ....	30
Figura 3.2 – Modelo dos fios atuadores de NiTi. ....	30
Figura 3.3 – Modelo usado para determinar o comprimento do fio de LMF no estado indeformado. ....	31
Figura 3.4 – Movimento gerado pelo fio de LMF. Adaptado de EPPS e CHOPRA (2001)....	33
Figura 3.5 – DSC ideal para uma LMF (RAO, SRINIVASA E REDDY, 2015). ....	37
Figura 3.6 – Gráfico tensão <i>versus</i> deformação da Superelasticidade da LMF (LAGOUDAS et al., 2003). ....	38
Figura 3.7 – Modelo usado na validação da sub-rotina SMA_UM (ABAQUS/Standard). ....	43
Figura 3.8 – Condição de contorno do modelo de validação (ABAQUS/Standard). ....	44
Figura 3.9 – Condição de carregamento do modelo de validação (ABAQUS/Standard). ....	44
Figura 3.10 – Discretização do modelo de validação (ABAQUS/Standard). ....	45
Figura 3.11 – Modelo do atuador desenvolvido no <i>software</i> ABAQUS/Standard. ....	46
Figura 3.12 – Condições de contorno do modelo do atuador. ....	46
Figura 3.13 – Malha do sistema de atuação. ....	47
Figura 3.14 – (a) Carregamento aplicado nos fios para obter a deformação inicial desejada. (b) Ampliação do carregamento.....	47
Figura 3.15 – Asa usada como base para o modelo.....	48
Figura 4.1 – Resultados experimentais do DSC da LMF. ....	49
Figura 4.2 – Resultado experimental do ensaio de tração. ....	51
Figura 4.3 – Módulo de elasticidade da fase austenita. ....	52
Figura 4.4 – Módulo de elasticidade da fase martensita. ....	52
Figura 4.5 – Resultados da validação da sub-rotina SMA_UM. ....	54
Figura 4.6 – Referência para o acionamento dos fios de LMF do atuador.....	55
Figura 4.7 – Movimento do <i>flap</i> simulado. (a) Acionamento do Fio 1, (b) Acionamento do Fio 2. ....	56
Figura 4.8 – Quantidade de giro gerada pelo atuador em função do período de atuação dos fios.....	57
Figura 4.9 – Deformação dos fios de memória de forma resultante da análise numérica. ....	58
Figura 4.10 – Diagrama de tensão do sistema de atuação. ....	59
Figura 4.11 – Pré-deformação dos fios de LMF.....	60

Figura 4.12 – Diagrama tensão <i>versus</i> deformação do sistema de atuação (a) para o Fio 1 e (b) para o Fio 2. ....	61
Figura 4.13 – Relação do giro obtido com a deformação inicial dada aos fios.....	64
Figura 4.14 – Relação da deformação recuperada pelo Fio 1 com a deformação inicial.....	65
Figura 4.15 – Relação da deformação recuperada pelo Fio 2 com a deformação inicial.....	66
Figura 4.16 – Comportamento da tensão no sistema de atuação para as deformações iniciais avaliadas.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação entre as principais LMF comercializadas.....	14
Tabela 3.1 – Sequência para inserção de parâmetros no <i>software</i> ABAQUS/Standard.....	42
Tabela 4.1 – Parâmetros obtidos pela análise de DCS da LMF. ....	50
Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas da LMF obtidas pelo ensaio de tração.....	53
Tabela 4.3 – Parâmetros obtidos na literatura e usados na sub-rotina SMA_UM.....	53
Tabela 4.4 - Parâmetros obtidos na literatura para o calculo do tempo.....	62
Tabela 4.5 – Tempo de aquecimento e de resfriamento da LMF. ....	63
Tabela 4.6 – Comparação do giro do elemento atuado calculado com o giro obtido na simulação. ....	64
Tabela 4.7 – Recuperação da deformação e deformação residual dos fios atuadores.....	66
Tabela 4.8 – Ângulo de giro calculado com a deformação residual nos fios de LMF. ....	67
Tabela 4.9 – Tabela que descreve a tensão de recuperação, força gerada pelo sistema e a queda de tensão. ....	68

## LISTA DE SÍMBOLOS

LMF	– Liga de Memória de Forma
EMF	– Efeito Memória de Forma
TM	– Transformação Martensítica
SE	– Superelasticidade
TR	– Transformação Reversa
NITINOL	– Liga Níquel Titânio
FVM	– Fração Volumétrica de Martensita
TFR	– Transformação de Fase Romboédrica
RPT	– <i>Rhombohedral-phase Transformation</i> (Transformação de Fase Romboédrica)
DSC	– <i>Differential Scanning Calorimetry</i> (Calorimetria Exploratória Diferencial)
$A_s$	– temperatura final de transformação austenítica (K)
$A_f$	– temperatura inicial de transformação austenítica (K)
$M_s$	– temperatura inicial de transformação martensítica (K)
$M_f$	– temperatura final de transformação martensítica (K)
$\sigma$	– tensão (MPa)
$\sigma_0$	– tensão inicial (MPa)
$\varepsilon$	– deformação (mm/mm)
$\varepsilon_0$	– deformação inicial (mm/mm)
$\Theta$	– tensor termoplástico (MPa/K)
$T$	– temperatura (K)
$T_0$	– temperatura inicial (K)

$\xi$	– fração volumétrica de martensita (adimensional)
$\xi_0$	– fração volumétrica de martensita inicial (adimensional)
$E$	– módulo de elasticidade (GPa)
$\nu$	– coeficiente de Poisson (adimensional)
$\Omega$	– coeficiente de transformação (GPa)
$E_A$	– módulo de elasticidade da fase austenita (GPa)
$E_M$	– módulo de elasticidade da fase martensita (GPa)
$\varepsilon_L$	– máxima deformação recuperável (mm/mm)
$a_A$	– constante do material da fase austenita ( $K^{-1}$ )
$b_A$	– constante do material da fase austenita ( $MPa^{-1}$ )
$a_M$	– constante do material da fase martensita ( $K^{-1}$ )
$b_M$	– constante do material da fase martensita ( $MPa^{-1}$ )
$C_A$	– coeficiente de influência da fase austenita (MPa/K)
$C_M$	– coeficiente de influência da fase martensita (MPa/K)
$\xi_T$	– FVM induzida pela temperatura (adimensional)
$\xi_S$	– FVM induzida pela tensão (adimensional)
$\sigma_s^{cr}$	– tensão crítica para conversão dos variantes de martensita inicial (MPa)
$\sigma_f^{cr}$	– tensão crítica para conversão dos variantes de martensita final (MPa)
$l_a$	– comprimento de arco (m)
$r$	– raio do eixo de giro (m)
$V$	– tensão elétrica (V)
$R$	– resistência elétrica ( $\Omega$ )
$I$	– corrente elétrica (A)
$\rho$	– resistividade do material ( $\Omega$ m)
$l_0$	– comprimento inicial (m)
$A$	– área da seção transversal do fio ( $m^2$ )

$\rho_A$	– resistividade do material na fase austenita ( $\Omega \text{ m}$ )
$\rho_M$	– resistividade do material na fase martensita ( $\Omega \text{ m}$ )
$Q$	– quantidade de energia térmica (J)
$\Delta t$	– variação do tempo em que a corrente fica aplicada ao fio (s)
$\Delta T$	– variação da temperatura do fio (K)
$m$	– massa do fio (kg)
$c$	– calor específico do material (J/kg K)
$C$	– condutividade térmica do material (J/s m K)
$Me$	– massa específica do material ( $\text{kg/m}^3$ )
$v$	– volume do fio ( $\text{m}^3$ )
$P$	– potência dissipada por convecção (J/s)
$h$	– coeficiente de transferência de calor por convecção (J/s $\text{m}^2 \text{ K}$ )
$A_C$	– área da superfície que troca calor com o ambiente do fio ( $\text{m}^2$ )
$\delta$	– ângulo de giro (rad)
$\varepsilon^r$	– deformação recuperável pelo sistema (mm/mm)
$\Delta l$	– variação do comprimento (adimensional)
$l_0$	– comprimento inicial (m)
$R_s$	– temperatura de início da transformação de fase R (K)
$R_f$	– temperatura de fim da transformação de fase R (K)
$\alpha_A$	– coeficiente de expansão térmica da fase austenita ( $\text{K}^{-1}$ )
$\alpha_M$	– coeficiente de expansão térmica da fase martensita ( $\text{K}^{-1}$ )
$\rho \Delta s^A$	– coeficiente de tensão da fase austenita (MPa/K)
$\rho \Delta s^M$	– coeficiente de tensão da fase martensita (MPa/K)

# 1

## INTRODUÇÃO

Existem vários sistemas de atuação usados atualmente que utilizam diferentes formas para transmitir força e movimento para um determinado dispositivo. Os sistemas de atuação mais comuns são o hidráulico, o pneumático e o eletromecânico, sendo todos estes usados pela indústria aeroespacial. Estes sistemas de atuação são relativamente pesados, pois são constituídos por vários outros elementos além do atuador, como motores elétricos, bombas hidráulicas, compressores de ar, *etc* (JANOCHA, 2004).

A indústria aeroespacial tem a constante busca na redução do peso de suas aeronaves, já que este influencia no consumo de combustível, quantidade de carga transportada pela aeronave, dentre outros (MAESTA, 2012). Uma possibilidade é a substituição dos sistemas de atuação usados atualmente por sistemas de atuação mais leves e com funcionamento mais simples.

Os candidatos em potencial para serem aplicados como atuadores em sistemas mecânicos são os chamados materiais inteligentes, como os materiais piezoelétricos, as ligas com memória de forma, os polímeros com memória de forma, as ligas com memória de forma magnética, os materiais magneto-strictivos e os fluidos eletroreológicos (BANDEIRA et al., 2006; CHOPRA, 2002; MADDEN et al., 2004; MAESTA, 2012; SCHLÜTER, HOLZ E RAATZ, 2012). Estes materiais, normalmente, são utilizados como sensores e atuadores, pois possuem características adaptativas, modificando sua forma ou uma propriedade física quando submetidos a um estímulo externo, como variações de temperatura, de campo elétrico, de campo magnético ou de tensão mecânica (BORN, 2007).

As ligas com memória de forma (LMF) ganharam atenção devido ao efeito memória de forma, ou seja, a sua capacidade de memorizar uma forma previamente definida e recuperá-la, depois de sofrer algum tipo de deformação, em determinadas temperaturas ou em ciclos de

carregamento e descarregamento (HUANG, 1998). Este material também tem a capacidade de gerar grande força durante a recuperação da forma (BANDEIRA et al., 2006; CHOPRA, 2002).

O comportamento termomecânico das LMF não é linear, devendo-se então usar um modelo constitutivo apropriado que descreva seu comportamento. Vários modelos constitutivos foram desenvolvidos ao longo dos anos, como o modelo de TANAKA (1986), LIANG E ROGERS (1990), o modelo de BOYD E LAGOUDAS (1996), entre outros, que utilizam propriedades mecânicas, físicas e térmicas para descrever o comportamento termomecânico das LMF.

O trabalho apresentado é dividido em cinco capítulos. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre as LMF, suas características físicas, mecânicas e térmicas e os modelos constitutivos desenvolvidos ao longo do tempo para análises não lineares e sobre a aplicação proposta para a liga, como atuador. O terceiro capítulo apresenta uma descrição dos métodos desenvolvidos neste estudo. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos pelas análises computacionais e experimentais. E, por fim, o quinto capítulo apresenta uma breve conclusão do assunto.

## **1.1 Justificativa**

A substituição de alguns materiais usados na indústria aeroespacial é importante para a redução do peso das aeronaves e o aumento da eficiência destas em voo. Com a descoberta dos materiais inteligentes possibilitou-se a fabricação de diversos componentes das aeronaves com peso reduzido. Um destes componentes é o atuador (CALKINS E MABE, 2010; HARTL et al., 2010).

Os atuadores clássicos são de diversos tipos e tamanhos, podendo ser pneumáticos, hidráulicos ou eletromecânicos, sendo que estes possuem elevado peso devido ao grande número de componentes que são necessários para ativá-los, como motores, bombas, sensores, *etc.*

Com o advento dos materiais inteligentes, foi possível desenvolver atuadores que teriam as mesmas funções que os atuadores já existentes, mas reduzindo o seu peso, pois o sistema de acionamento destes não possui muitos componentes e estes materiais possuem peso específico

muito inferior aos dos materiais usados nos atuadores clássicos. Em algumas aplicações melhora-se significativamente, também, a eficiência do equipamento, já que os materiais inteligentes possuem tempo de resposta mais rápido.

Neste trabalho será abordado o uso de um destes materiais inteligentes como atuador, estudando a sua aplicação e comportamento, para a movimentação de um *flap*.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Principal**

Avaliar um atuador constituído de fios de liga de memória de forma com a função de mover uma das superfícies de comando de uma aeronave, através de uma abordagem experimental e pelo método dos elementos finitos.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Estudar as características mecânicas e térmicas da liga de NiTi com memória de forma, a fim de adquirir conhecimento sobre este material, focando principalmente na propriedade memória de forma.

Avaliar e comparar diferentes modelos constitutivos da liga de memória de forma.

Aplicar a liga de memória de forma como atuador constituído por fios, baseado no efeito memória de forma da liga.

Modelar e simular o atuador de liga com memória de forma em um programa de análise de elementos finitos.

Avaliar os resultados obtidos pelas análises a fim de determinar a possibilidade de uso da liga como atuador de aeronave.

# 2

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Ligas de Memória de Forma

As ligas com memória de forma (LMF) consistem em um grupo de materiais metálicos capazes de retornar à sua forma original quando submetidos a uma temperatura elevada. Esta capacidade é denominada efeito memória de forma (EMF). O material apresenta esta propriedade por exibir a transformação martensítica (TM), que é uma transformação de fase no estado sólido, adifusional, que ocorre durante o resfriamento entre as fases austenita (fase de origem, de maior temperatura) e a fase martensita (fase produto, de temperatura mais baixa). A liga deformada na fase martensita estável a baixa temperatura recupera sua forma original quando aquecida acima de uma temperatura crítica, onde a fase austenita é mais estável (FUNAKUBO E KENNEDY, 1987; OTSUKA E WAYMAN, 1998; SANTOS, 2013).

É importante lembrar que tanto a martensita quanto a austenita podem ser a fase estável a temperatura ambiente, dependendo do histórico termomecânico da liga e principalmente de sua composição química. Sendo assim, a mesma liga pode apresentar EMF e também a propriedade chamada de “superelasticidade” (SE), que está associada à fase austenita, quando esta é a mais estável. Nesta fase a liga pode recuperar grandes deformações (cerca de 8%) no ciclo de carregamento e descarregamento, ou seja, a liga sob carregamento pode sofrer deformações muito grandes que são totalmente recuperáveis com a retirada da carga. Esta propriedade está associada ao fato de que a martensita também pode ser induzida por tensão. Com a retirada da carga, ocorre a chamada transformação reversa (TR, de martensita para austenita), uma vez que a austenita é mais estável (OTSUKA E WAYMAN, 1998).

Estando o EMF e a SE diretamente relacionados com a transformação martensítica (TM), compreendê-la é necessário. A TM pode ser definida como uma transformação de fase que

ocorre através do movimento cooperativo de átomos, ou seja, os átomos envolvidos na transformação se movem em conjunto e em curtas distâncias, devido ao mecanismo de cisalhamento (FUNAKUBO E KENNEDY, 1987; OTSUKA E WAYMAN, 1998).

Em aços, ocorre uma transformação semelhante quando este é submetido ao tratamento térmico de têmpera, onde o aço na fase austenita ao ser resfriado bruscamente adquire uma microestrutura extremamente fina e dura denominada martensita. O nome martensita foi dado em homenagem ao metalurgista alemão Adolf Martens (FUNAKUBO E KENNEDY, 1987). A diferença aqui é que esta transformação em aços não é termoelástica e, conseqüentemente, não é reversível, como no caso das LMF.

Como discutido anteriormente, a transformação martensítica ocorre entre a fase austenita, estável a temperaturas mais elevadas, e a fase martensita, estável a temperaturas mais baixas. A fase austenita possui estrutura cristalina cúbica do tipo B2 e, a fase martensita possui estrutura cristalina monoclnica, de menor simetria. A Figura 2.1 mostra um esquema da transformação martensítica (LAGOUDAS et al., 2008; OTSUKA E WAYMAN, 1998).

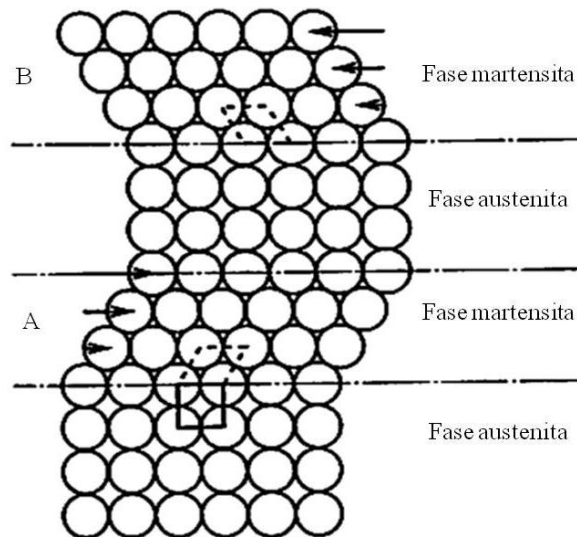


Figura 2.1 – Esquema da transformação martensítica. Adaptado de OTSUKA E WAYMAN (1998).

No processo de resfriamento de uma LMF, ao atingir-se uma temperatura crítica  $M_s$  (início da transformação martensítica), a TM se inicia através do mecanismo de cisalhamento, dando origem a uma região com uma nova estrutura cristalina, regiões A e B mostradas na Figura 2.1. O processo termina ao atingir-se a temperatura  $M_f$  (fim da transformação martensítica).

As regiões A e B são denominadas de maclas de martensita e, por terem menor simetria, muitas maclas podem ser formadas a partir da fase austenita, apresentando a mesma estrutura cristalina, porém com diferentes orientações. Caso a temperatura seja novamente elevada, a fase martensita não será mais estável, ocorrendo a transformação reversa, TR, a partir da temperatura  $A_s$  (início da transformação reversa) e terminando em  $A_f$  (fim da transformação reversa), onde a liga será totalmente austenítica. Este processo caracteriza o efeito memória de forma (OTSUKA E WAYMAN, 1998).

A TM é uma transformação de primeira ordem, portanto ocorre por nucleação e crescimento. Além de estar associada à mudança de forma, mostrada na Figura 2.2 (a), gera grande deformação em torno da variante de martensita quando esta é formada a partir da fase austenita. Durante o resfriamento, essa deformação provocada pelo crescimento de uma variante de martensita deve ser aliviado. Este alívio pode acontecer de duas maneiras: pelo mecanismo de deslizamento ou pelo mecanismo de maclação, mostrados na Figura 2.2 (b) e (c), respectivamente. Estes mecanismos são denominados deformações invariantes de rede, uma vez que o processo não altera a estrutura da martensita. A forma macroscópica do sólido permanece a mesma da estrutura austenítica, não importando o tipo de mecanismo de deformação invariante. Nas LMF o mecanismo de deformação invariante preferencial é o de maclação, pois neste não há a quebra de ligações, diferente do mecanismo de escorregamento, tornando-o cristalograficamente reversível (OTSUKA E REN, 2005).

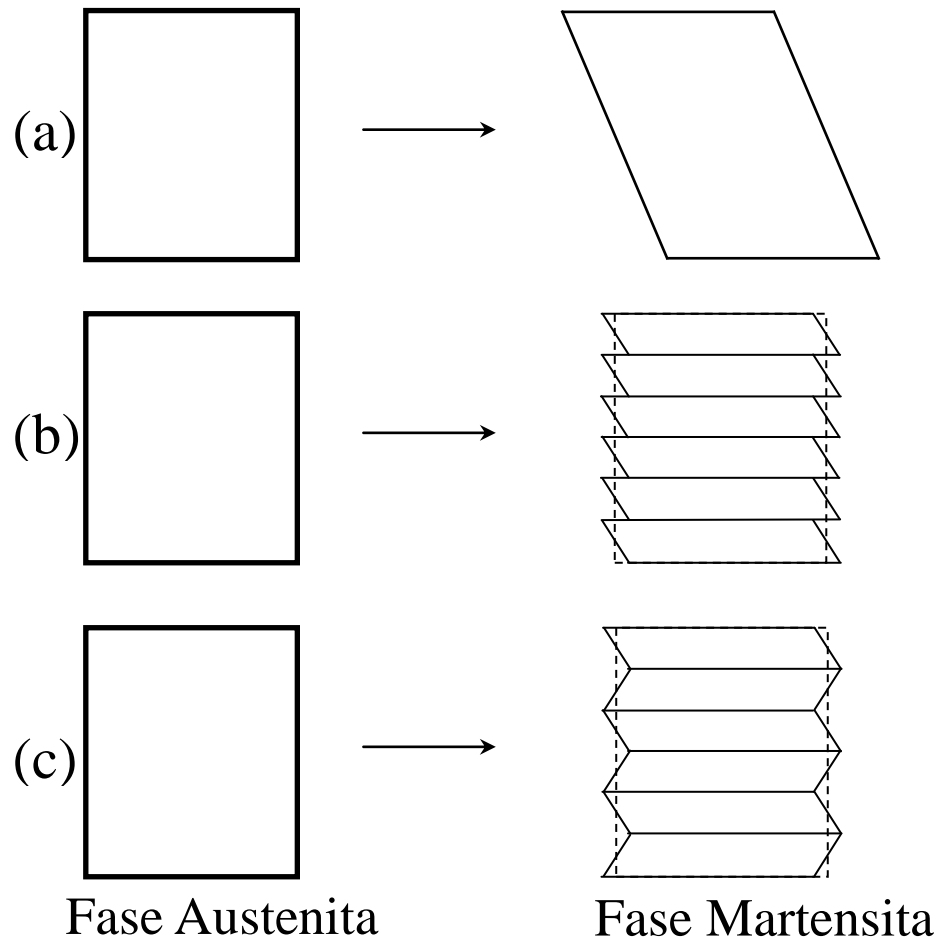


Figura 2.2 – Representação dos tipos de deformação invariante na transformação martensítica. (a) mudança de forma da transformação martensítica. (b) acomodação da deformação por escorregamento. (c) acomodação da deformação por maclação. Adaptado de OTSUKA E WAYMAN (1998).

Os contornos de macla possuem grande facilidade de se movimentar quando submetidos à tensão. Análises cristalográficas mostram que os contornos entre os variantes de martensita também se comportam como contornos de maclas, como consequência do processo de auto-acomodação de variantes durante o resfriamento (SANTOS, 2013). O resultado final da TM durante o resfriamento é uma estrutura de variantes de martensita com maclas internas (subestrutura) como mostra a Figura 2.3 (a) (OTSUKA E WAYMAN, 1998; SANTOS, 2013).

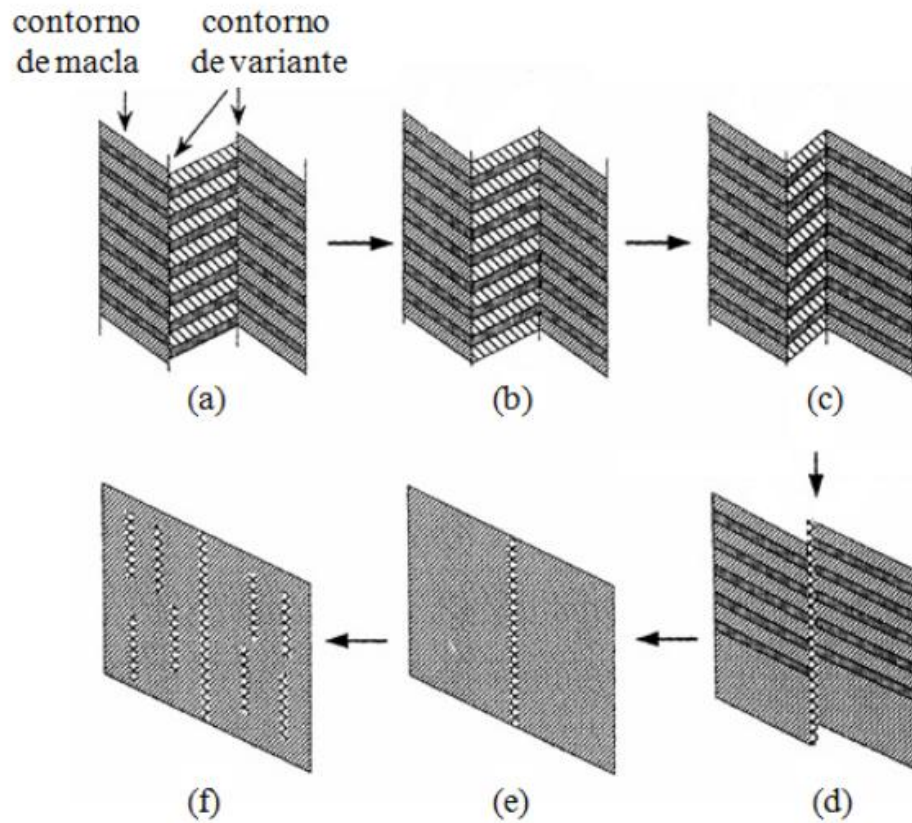


Figura 2.3 – Representação esquemática do processo de movimento do contorno de macla pela aplicação de tensão na martensita. (a) estado indeformado; (b) acomodação de maclas e formação de maclas compostas; (c) reorientação da martensita; (d) reorientação adicional e demacção da martensita; (e) processo de demacção; (f) geração de deslocamentos adicionais pela deformação. Adaptado de LIU et al. (1999).

As interfaces formadas na TM são móveis, então, ao aplicar-se tensão, o movimento dos contornos de variantes é iniciado, promovendo o crescimento de variantes que estão favoravelmente orientados em relação à direção da tensão aplicada, promovendo a reorientação da martensita. Ao mesmo tempo há o movimento dos contornos de macla que formam a subestrutura, gerando o processo de demacção. A Figura 2.3 (b) a (f) apresenta os processos de reorientação da martensita e de demacção devido à aplicação da tensão (SANTOS, 2013).

A TM e a TR são transformações que ocorrem em temperaturas definidas que variam de acordo com a composição química e o histórico termomecânico da liga, como discutido anteriormente. A Figura 2.4 mostra que o caminho de transformação no resfriamento não é igual ao caminho no aquecimento, formando uma histerese térmica. Esta histerese está

associada ao atrito gerado pelo movimento dos contornos de maclas e variantes, que pode ser atribuído a energia dissipada pelo sistema durante o ciclo de TM e TR. A magnitude da histerese varia com o tipo de liga (OTSUKA E WAYMAN, 1998).

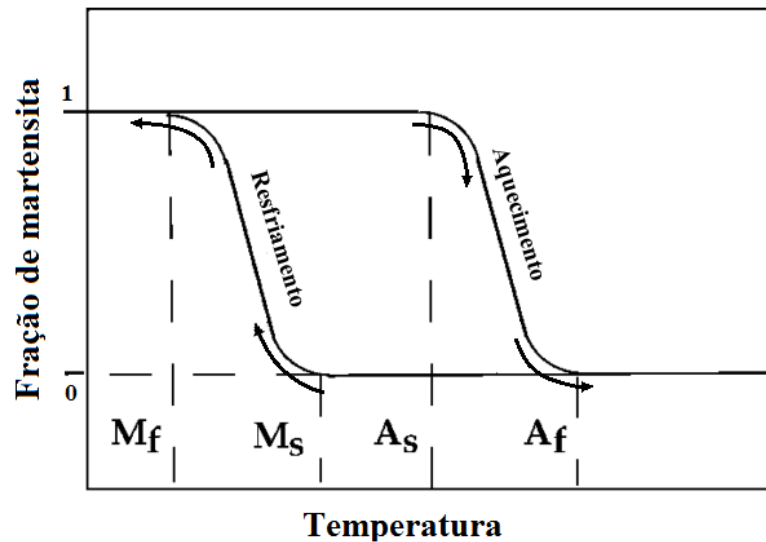


Figura 2.4 – Temperaturas de transformação em função da fração volumétrica martensítica.

Adaptado de CHOPRA (2002).

### 2.1.1 Efeito memória de Forma

No ano de 1951, o Efeito Memória de Forma (EMF) foi primeiramente observado na liga AuCd, por Chang e Read (BRINSON, 1993), e depois nas ligas InTi e CuZn, sem despertarem grande interesse. O avanço para aplicações na engenharia ocorre com a descoberta da liga NiTi por Buehler e colaboradores em 1963 no *Naval Ordnance Laboratory* (NOL), nomeando sua descoberta de NITINOL em referência ao seu laboratório (LAGOUDAS et al., 2008). A liga NiTi apresenta o EMF maior do que outras ligas metálicas, observando-se uma total recuperação de grandes deformações (CHOPRA, 2002). Em 1970, o mesmo fenômeno foi observado na liga CuAlNi e tornou-se claro que este comportamento é comum em ligas que sofrem a transformação martensítica (OTSUKA E WAYMAN, 1998).

Pode-se descrever o EMF a partir das transformações que regem a liga. Considerado-se uma liga inicialmente na fase martensita, em temperaturas menores que  $A_s$  e livre de tensões, a mesma irá apresentar uma microestrutura na forma de variantes de martensita e suas respectivas maclas, como mostrada na Figura 2.5 (a). Aplicando-se uma tensão no sistema,

como representado na Figura 2.5 (b), o movimento dos contornos se inicia, reorientado e demaclinando a martensita. Conseqüentemente o material apresentará grande deformação aparentemente permanente.

Retirando o carregamento, apenas uma pequena parte da deformação do material é recuperada, deformação elástica, Figura 2.5 (c). O processo de deformação descrito acima é assumido ser unicamente causado por movimento de contornos de macla, e que a transformação é cristalograficamente reversível. A deformação residual é recuperada pelo aquecimento do material acima da temperatura crítica,  $A_f$ . Durante o resfriamento, o material sofre a TM, fazendo com que a sua estrutura retorne para martensita; neste processo o material não sofre qualquer alteração macroscópica, permanecendo na sua forma original.

O EMF descrito acima pode ser definido, de forma mais simples, como o processo de recuperação de forma que ocorre pelo aumento da temperatura da liga, ou seja, a deformação sofrida pelo material é recuperada quando este é aquecido a temperaturas maiores que  $A_f$  (FUNAKUBO E KENNEDY, 1987; LAGOUDAS et al., 2008; OTSUKA E WAYMAN, 1998).

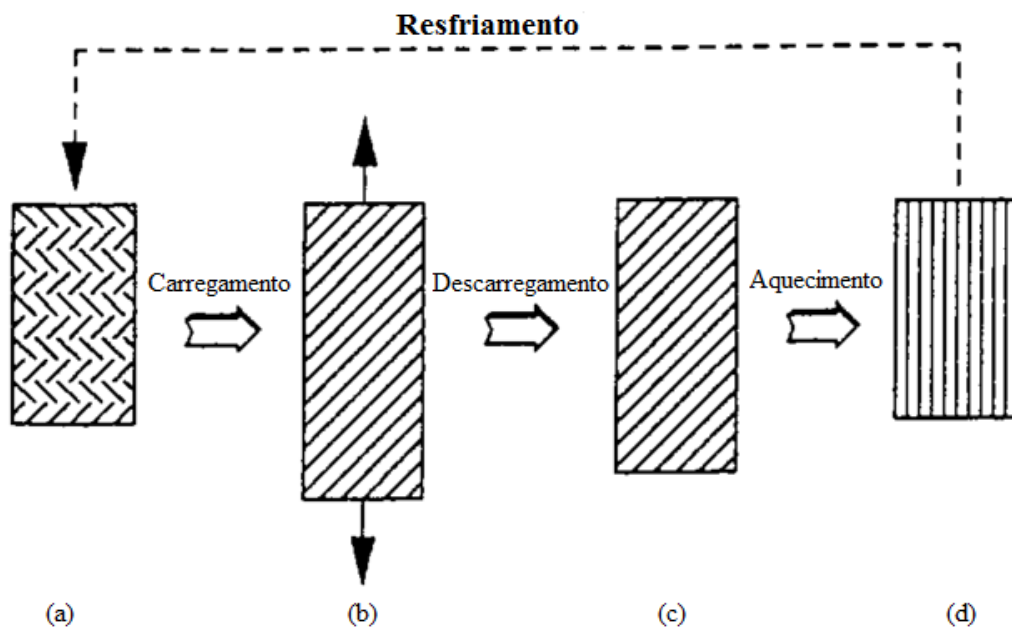


Figura 2.5 – Representação do EMF. (a) martensita maclada. (b) processo de demaclição da martensita sob tensão. (c) martensita demacliada livre de tensão. (d) recuperação da forma original. Adaptado de BRINSON (1993).

A deformação sofrida pelo material deve ser menor ou igual à máxima deformação recuperável da liga (BRINSON, 1993). Deformações maiores fazem com que o material não possa recuperar totalmente sua forma original. A Figura 2.6 apresenta um esquema das transformações microestruturais que ocorrem no EMF.

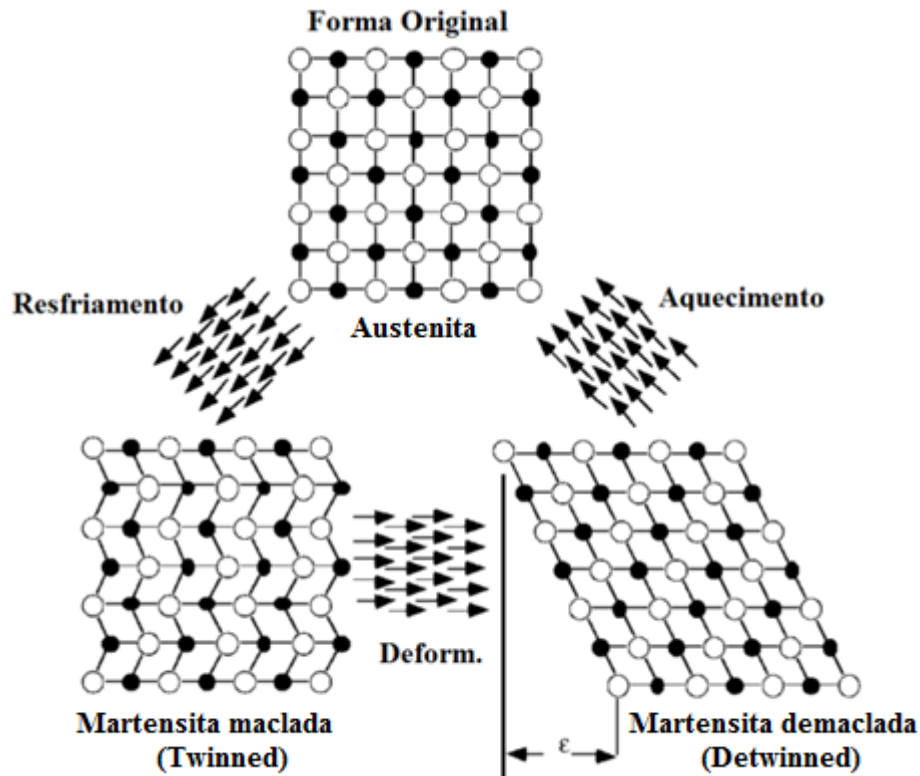


Figura 2.6 – Transformação de fase no EMF. Adaptado de CHOPRA (2002).

O comportamento mecânico típico deste efeito é mostrado na Figura 2.7. No ponto (a) o material está livre de tensões, no estado indeformado. Aplicando tensão, o material vai passar pelo regime elástico, que vai do ponto (a) ao ponto (b), onde inicia-se o patamar de reorientação da martensita, do ponto (b) ao ponto (c). O patamar é a região em que ocorre o processo de demaçoção e crescimento das variantes de martensita. Do ponto (c) ao ponto (d) o material retoma o seu regime elástico, com toda a sua estrutura martensítica, reorientada, ou seja, o material possui uma única variante de martensita orientado de forma favorável à direção da tensão aplicada. Do ponto (d) ao ponto (e) o material é descarregado, e parte da deformação imposta é recuperada pelo efeito elástico da liga. Aquecendo o material, este recupera sua forma original, fazendo a deformação residual retornar a zero, caminho do ponto (e) ao ponto (a) (SANTOS, 2013).

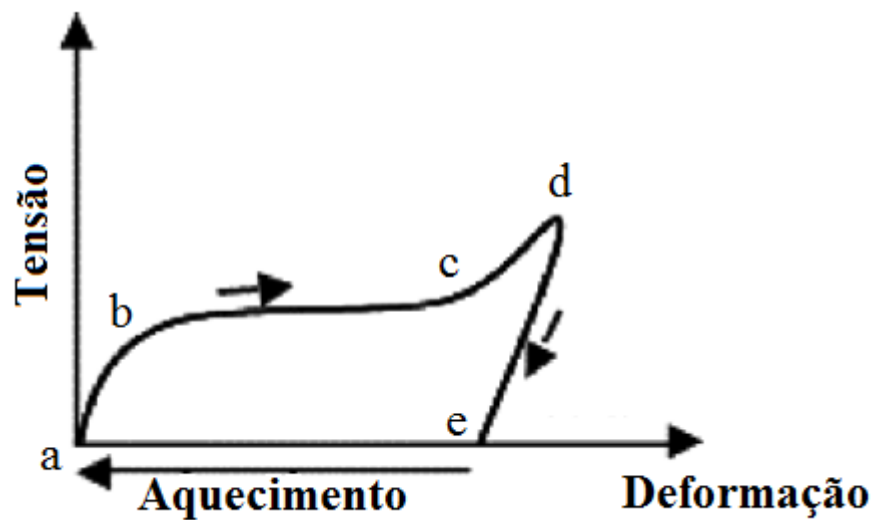


Figura 2.7 – Comportamento mecânico típico do EMF. Adaptado de CHOPRA (2002).

### 2.1.2 Superelasticidade

A superelasticidade (SE) é uma propriedade acoplada ao EMF, ou seja, as LMF apresentam ambos os efeitos. É caracterizada por não necessitar da alteração da temperatura da LMF para que as transformações de fase ocorram e conseqüentemente a recuperação de forma (FUNAKUBO E KENNEDY, 1987; OTSUKA E WAYMAN, 1998).

A LMF a princípio na fase austenita é submetida a uma tensão externa suficientemente grande para induzir a formação de martensita no material, a martensita induzida pela tensão. Causando-se grande deformação no material, na SE a deformação recuperável pode chegar a cerca de 8%, que é recuperada quase que imediatamente com a retirada da tensão aplicada. A transformação de fase na SE é mostrada na Figura 2.8. Para que a LMF exiba a SE a temperatura  $A_f$  deste deve ser menor que a temperatura de trabalho (FUNAKUBO E KENNEDY, 1987; OTSUKA E WAYMAN, 1998; RAO, SRINIVASA E REDDY, 2015).

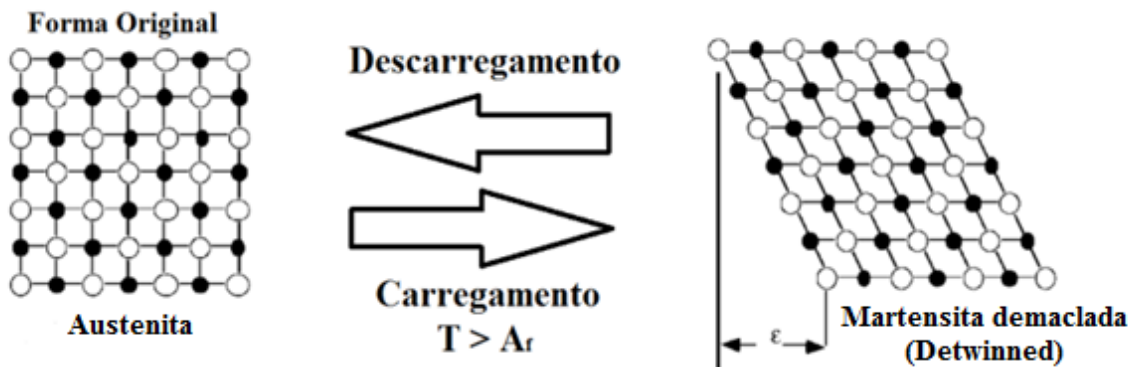


Figura 2.8 – Transformação de fase no SE. Adaptado de CHOPRA (2002).

O comportamento mecânico típico deste efeito é mostrado na Figura 2.9. No ponto (a) o material está livre de tensões, no estado indeformado. Aplicando-se tensão, o material vai passar pelo regime elástico, na fase austenita, que vai do ponto (a) ao ponto (b). O ponto (b) é denominado tensão crítica para a formação da martensita demaçada, onde inicia-se a nucleação e crescimento da martensita induzida pela tensão. O patamar que vai do ponto (b) ao ponto (c) representa o crescimento das variantes de martensita induzida pela tensão, onde há um grande acréscimo na deformação do material sem um aumento considerável na tensão. Retirando a tensão aplicada no material, a deformação é recuperada pela TR, ponto (c) ao ponto (d), o material apresenta recuperação elástica da deformação. O ponto (d) é o valor de tensão no qual a martensita induzida pela tensão se torna instável. A partir deste ponto o material sofre a TR, que vai do ponto (d) ao ponto (e). A deformação residual é recuperada pelo efeito elástico (SANTOS, 2013).

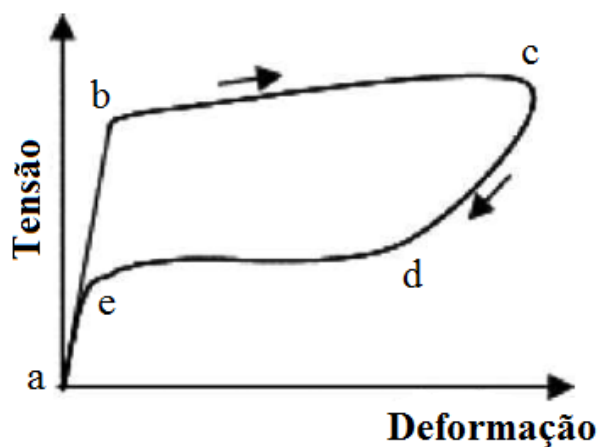


Figura 2.9 – Comportamento mecânico típico do SE. Adaptado de (CHOPRA, 2002).

### 2.1.3 Aplicações das LMF

Entre as LMF descobertas no decorrer dos anos, as ligas NiTi e CuZnAl são as mais favoráveis para a aplicação prática. As propriedades destas ligas são divergentes, mas de forma geral a liga de NiTi é muito superior a liga de CuZnAl, embora a última possua a vantagem do custo (FUNAKUBO E KENNEDY, 1987). A Tabela 2.1 apresenta uma comparação de algumas propriedades destas ligas.

Tabela 2.1 – Comparação entre as principais LMF comercializadas.

<b>Propriedade</b>	<b>Liga NiTi</b>	<b>Liga CuZnAl</b>
Deformação Recuperável	máx. 8%	máx. 4%
Tensão gerada na recuperação	máx. 400 MPa	max. 200 MPa
Fadiga	$10^5$ ( $\varepsilon = 0,02$ ) $10^7$ ( $\varepsilon = 0,005$ )	$10^2$ ( $\varepsilon = 0,02$ ) $10^5$ ( $\varepsilon = 0,005$ )
Resistência a Corrosão	Boa	Problemática, especialmente sob tensão
Trabalhabilidade	Pobre	Razoável
Conformação	Relativamente fácil	Razoavelmente difícil

Fonte: Adaptado de FUNAKUBO E KENNEDY (1987).

Para aplicações mais nobres, usa-se quase que exclusivamente a liga NiTi, sendo esta aplicada em atuadores, sensores, acoplamentos e dispositivos médicos e odontológicos (RAO, SRINIVASA E REDDY, 2015). A primeira aplicação da liga de NiTi foi como um sistema de acoplamento de tubos hidráulicos em aeronaves, mostrado na Figura 2.10, baseado no EMF da liga (FUNAKUBO E KENNEDY, 1987).

### Inserir os tubos depois de expandir o acoplador

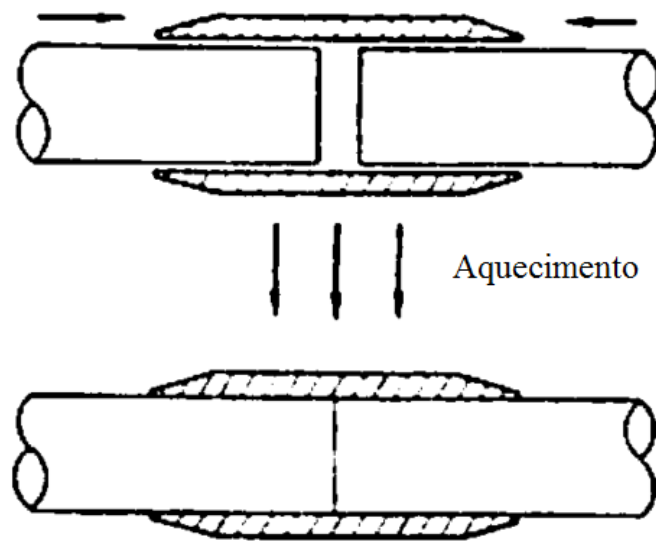


Figura 2.10 – Acoplador de tubos de LMF. Adaptado de FUNAKUBO E KENNEDY (1987).

Como mostrado na Figura 2.10, o acoplador de NiTi é deformado, expandindo-o, para que os tubos possam ser colocados no seu interior. Aquecendo-se o acoplador, ele retorna a sua forma original, prendendo os tubos no seu interior (FUNAKUBO E KENNEDY, 1987).

Uma das técnicas utilizadas para se aplicar este material é a técnica que combina a LMF com algum elemento mecânico ou até mesmo outro componente de LMF capaz de deformar a liga depois que esta recuperar sua forma original. Um exemplo simples desta técnica é mostrado na Figura 2.11. A vantagem desta técnica é que a força produzida na recuperação ou na deformação pode ser arbitrariamente selecionada pelo ajuste do tamanho da força do componente mecânico. Este tipo de sistema não é usado na prática devido a restrições de posição do componente e por ser suscetível a oscilações. Na prática, usa-se sistemas de forças fornecido por molas.

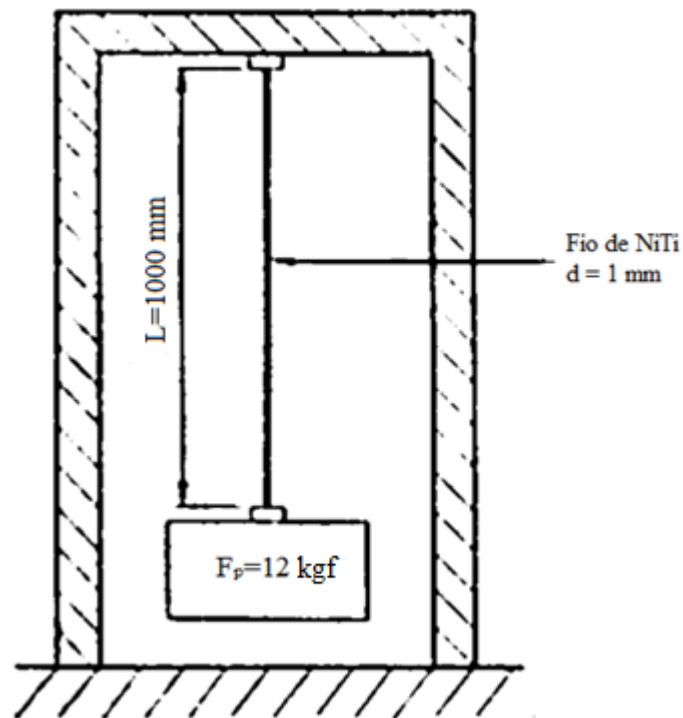


Figura 2.11 – Exemplo de aplicação da LMF. Adaptado de FUNAKUBO E KENNEDY (1987).

Outra forma de aplicar-se o material é explorar a disparidade entre a força de recuperação de forma em alta temperatura e a força de deformação em baixa temperatura, ou seja, utilizar a força gerada na recuperação de forma a alta temperatura para deformar a liga à baixa temperatura. A força gerada pelo sistema é igual à diferença entre estas duas forças. Este tipo de dispositivo é constituído por dois fios de memória de forma antagônicos.

A vantagem mais significativa deste tipo de dispositivo é que a força gerada e a eficiência são maiores. Um exemplo de uso deste sistema é no desenvolvimento de motores térmicos para converter um baixo grau de energia (como o encontrado em fontes termais ou em águas residuais quentes) em energia mecânica (FUNAKUBO E KENNEDY, 1987).

#### 2.1.4 Modelo Constitutivo de Ligas de Memória de Forma

Vários modelos constitutivos foram desenvolvidos para descrever o comportamento termomecânico das ligas com memória de forma. Alguns são baseados em micromecânica, outros em uma combinação de micro e macro mecânica, mecânica estatística ou métodos cinemáticos. Mas com o desenvolvimento dos métodos numéricos, tal como o método dos

elementos finitos, teve-se uma preferência por métodos contínuos, que utilizam constantes típicas de engenharia como parâmetros.

O modelo constitutivo desenvolvido por TANAKA (1986) foi o primeiro modelo e o mais popular, sendo um modelo unidirecional que se baseia na segunda lei da termodinâmica e é escrito em termos da energia livre de Helmholtz na forma variacional. Neste modelo a deformação, a temperatura e a Fração Volumétrica de Martensita (FVM) são as únicas variáveis de estado. A Equação (2.1) mostra o modelo desenvolvido por Tanaka.

$$(\sigma - \sigma_0) = E(\xi)(\varepsilon - \varepsilon_0) + \Theta(T - T_0) + \Omega(\xi)(\xi - \xi_0) \quad (2.1)$$

onde o subscrito 0 representa as condições iniciais do sistema,  $\sigma$  é a tensão,  $\varepsilon$  é a deformação,  $\Theta$  é o tensor termoplástico,  $T$  é a temperatura e  $\xi$  é a FVM. A Equação (2.1) também nos mostra que a tensão total do sistema é constituída por três parcelas, a tensão mecânica, a tensão termoplástica e a tensão induzida pela transformação de fase. O módulo de elasticidade,  $E$ , e o coeficiente de transformação,  $\Omega$ , são descritos em função da FVM, como mostrado nas Equações (2.2) e (2.3).

$$E(\xi) = E_A + \xi(E_M - E_A) \quad (2.2)$$

$$\Omega(\xi) = -\varepsilon_L + E(\xi) \quad (2.3)$$

onde  $E_A$  e  $E_M$  são os módulos de elasticidade da fase austenita e da fase martensita, respectivamente, e  $\varepsilon_L$  é a máxima deformação recuperável. Tanaka descreve a variação da fração volumétrica de martensita na forma exponencial como uma função que depende do estado de tensão da liga e de sua temperatura, onde a função para a transformação da fase austenita para a martensita (TM) é mostrada na Equação (2.4) e a transformação de fase martensita para a austenita (TR) é mostrada na Equação (2.5).

Transformação de fase de austenita para martensita.

$$\xi = 1 - \exp [a_M(M_s - T) + b_M\sigma] \quad (2.4)$$

Transformação de fase de martensita para austenita.

$$\xi = \exp [a_A(A_S - T) + b_A\sigma] \quad (2.5)$$

As constantes  $a_A$ ,  $a_M$ ,  $b_A$  e  $b_M$  são constantes do material determinadas pelas Equações (2.6), (2.7), (2.8) e (2.9), respectivamente, e dependentes das temperaturas de transformação.

$$a_A = \frac{2\ln(10)}{(A_f - A_s)} \quad (2.6)$$

$$a_M = \frac{-2\ln(10)}{(M_s - M_f)} \quad (2.7)$$

$$b_A = \frac{a_A}{C_A} \quad (2.8)$$

$$b_M = \frac{a_M}{C_M} \quad (2.9)$$

onde  $C_A$  e  $C_M$  são coeficientes de influência da tensão nas fases austenita e martensita, respectivamente.

A Figura 2.4 apresenta o comportamento da FVM em função da temperatura. A FVM de uma LMF a temperaturas baixas, abaixo de  $M_f$ , tem valor de  $\xi$  igual a 1. Durante o aquecimento, quando se atinge temperaturas maiores que  $A_s$  este valor começa a diminuir, pois a transformação de fase no material se inicia. Se o material completar a transformação de fase o valor de  $\xi$  chega a zero, para temperaturas maiores que  $A_f$ . No resfriamento, a FMV começa a aumentar em temperaturas menores que  $M_s$ , chegando ao máximo na temperatura  $M_f$ , onde a única fase presente é a martensita. Os coeficientes adotados,  $E$ ,  $\theta$ ,  $\Omega$ ,  $C_A$ ,  $C_M$  e as temperaturas de transformação são determinados experimentalmente (CHOPRA, 2002).

Outro modelo constitutivo desenvolvido é o de LIANG E ROGERS (1990), que é baseado no modelo de Tanaka, com a diferença de que estes autores descrevem a relação da FVM com a temperatura e a tensão com uma função coseno, como mostrado nas Equações (2.10) e (2.11).

Transformação de fase de austenita para martensita.

$$\xi = \frac{1 - \xi_0}{2} \cos[a_M(T - M_f) + b_M\sigma] + \frac{1 + \xi_0}{2} \quad (2.10)$$

Transformação de fase de martensita para austenita.

$$\xi = \frac{\xi_0}{2} \{\cos[a_A(T - A_s) + b_A\sigma] + 1\} \quad (2.11)$$

onde as constantes  $a_A$ ,  $a_M$ ,  $b_A$  e  $b_M$  são definidas pelas Equações (2.12), (2.13), (2.14) e (2.15).

$$a_A = \frac{\pi}{(A_f - A_s)} \quad (2.12)$$

$$a_M = \frac{\pi}{(M_s - M_f)} \quad (2.13)$$

$$b_A = \frac{-a_A}{C_A} \quad (2.14)$$

$$b_M = \frac{-a_M}{C_M} \quad (2.15)$$

A função cosseno descrita acima pode assumir valores entre 0 e  $\pi$ , implicando que a transformação ocorre somente em intervalos definidos, o mesmo ocorre com a tensão, estas condições são descritas na Equações (2.16) e (2.17).

Transformação de fase de austenita para martensita.

$$M_f \leq T \leq M_s \quad \text{e} \quad (2.16)$$

$$C_M(T - M_f) - \frac{\pi}{|b_M|} \leq \sigma \leq C_M(T - M_f)$$

Transformação de fase de martensita para austenita.

$$A_s \leq T \leq A_f \quad \text{e} \quad (2.17)$$

$$C_A(T - A_s) - \frac{\pi}{|b_A|} \leq \sigma \leq C_A(T - A_s)$$

A relação da temperatura de transformação da LMF com o estado de tensão a que esta é submetida é mostrada na Figura 2.12, onde os parâmetros,  $C_A$  e  $C_M$ , já citados, são definidos como a inclinação das retas. Para os modelos de LIANG E ROGERS (1990) e TANAKA (1986) estes parâmetros são considerados iguais.

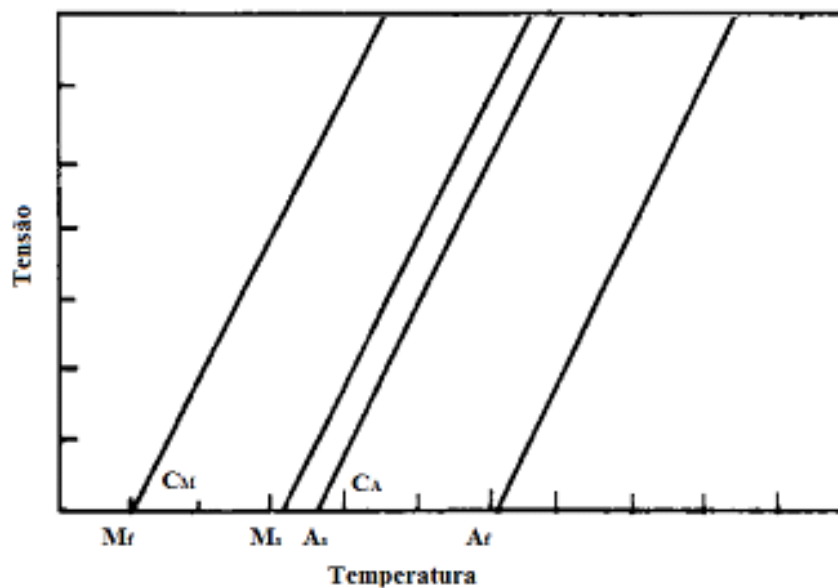


Figura 2.12 – Temperatura de transformação *versus* tensão. Adaptado de LIANG E ROGERS (1990)

A desvantagem dos modelos citados anteriormente é que estes descrevem a transformação entre as fases austenita e martensita e a transformação de fase induzida pela tensão (superelasticidade), não considerando as transformações microestruturais que ocorrem na fase martensita, que caracteriza o EMF. Sendo assim, estes modelos são mais usados para descrever a superelasticidade das LMF.

Para suprir esta lacuna, vários pesquisadores buscaram desenvolver formas de aprimorar o modelo de Tanaka de forma que este pudesse descrever por completo o comportamento da LMF. Uma das formas proposta para solucionar este problema foi o de introduzir no modelo o efeito chamado de Transformação de Fase Romboédrica (TFR) ou *Rhombohedral-phase Transformation* (RPT), que é uma transformação de fase termicamente reversível, estável a baixas temperaturas e baixa deformação, se comportando como a fase martensita demaçada. Esta pode ser notada a altas temperaturas na forma de pequenas não linearidades em uma região linear na curva superelástica (BARBARINO et al., 2014).

BRINSON (1993) propôs um modelo que apresenta a unificação das leis constitutivas de TANAKA (1986) e LIANG E RORGERS (1990). Considerando que a FVM é composta de duas partes, Equação (2.18), uma parte induzida puramente pela temperatura,  $\xi_T$ , com múltiplos variantes de martensita e outra induzida pela tensão,  $\xi_s$ , levando a formação de um único variante de martensita. A FVM induzida pela tensão representa a quantidade de martensita demaçada presente na liga e a induzida pela temperatura representa a quantidade de martensita maçada, onde a soma das duas parcelas varia entre 0 e 1.

$$\xi = \xi_s + \xi_T \quad (2.18)$$

A separação da FVM é justificada pelo comportamento micromecânico da LMF, sendo efetuada de tal forma que a fração martensítica induzida pela tensão represente a extensão da transformação do material dentro de uma simples variação da quantidade de martensita orientada na direção do carregamento.

Com a distinção, demonstra-se que o modelo pode capturar tanto a transformação martensítica induzida pela tensão, em temperaturas acima de  $A_s$ , como acompanhar o comportamento do EMF e da SE associadas com a conversão de martensita em austenita (ou transformação de austenita em martensita) com a aplicação da tensão em todas as temperaturas. A relação da

tensão com a temperatura de transformação, Figura 2.13, também é alterada para acomodar as definições de  $\xi_T$  e  $\xi_S$ , e permitir a análise do EMF em temperaturas menores que  $M_s$ , onde as tensões críticas para a conversão dos variantes de martensita,  $\sigma_s^{cr}$  e  $\sigma_f^{cr}$ , abaixo de  $M_s$  são constantes, considerando assim esta relação da FVM com as demais propriedades do material, juntamente com os parâmetros  $C_M$  e  $C_A$ , que são válidos em temperaturas maiores que  $M_s$ . A variação da tensão crítica com a temperatura é devida à separação do FVM em duas partes, ou seja,  $C_M$  é diferente de  $C_A$  (BRINSON, 1993).

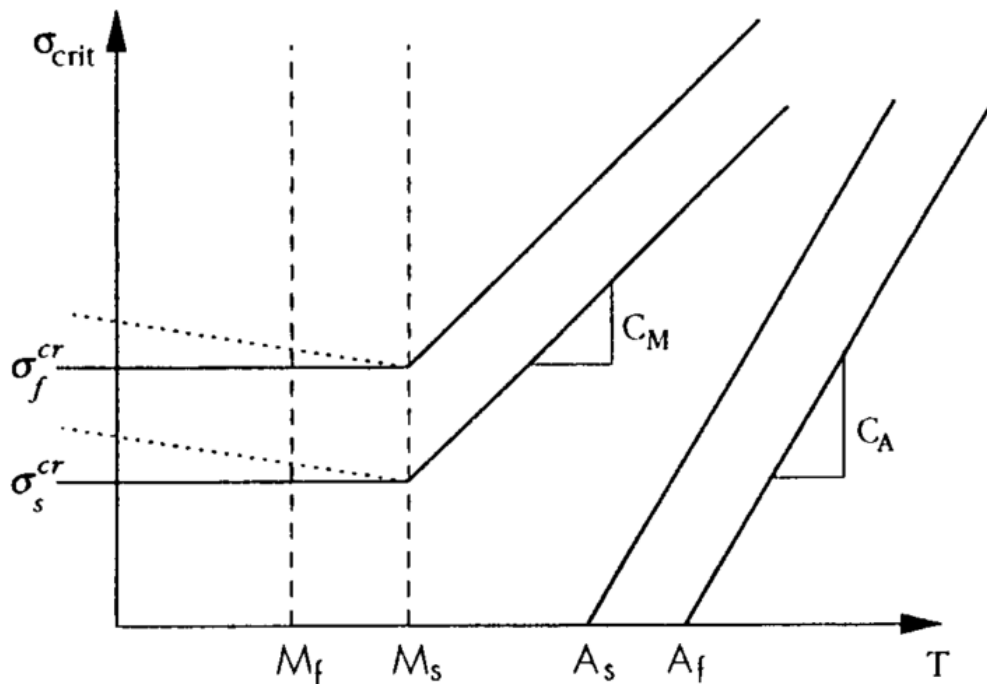


Figura 2.13 – Relação da tensão crítica com a temperatura para o modelo constitutivo de Brinson (BRINSON, 1993).

BOYD E LAGOUDAS (1996a) desenvolveram um modelo constitutivo baseado no comportamento termodinâmico da LMF, dado em função da energia livre e do potencial de dissipação. A relação constitutiva é descrita pela energia livre de Gibbs total, que é determinada pela soma da energia livre de cada fase da LMF mais a energia livre da mistura, diferente dos modelos anteriores que utilizam a energia livre de Helmholtz. A deformação total consiste de duas partes, a deformação mecânica e a deformação de transformação, que é uma função da FVM. A escolha da energia livre de Gibbs deu-se pela facilidade de comparar os resultados do modelo com os resultados experimentais. Desenvolve-se, assim, um modelo capaz de avaliar o efeito tridimensional e de carregamento não proporcional que pode ser

utilizado para descrever o comportamento de materiais compósitos que usam a LMF como reforço (BOYD E LAGOUDAS, 1996a, 1996b; CHOPRA, 2002).

Paiva e seus colaboradores (PAIVA et al., 2005), propuseram um modelo constitutivo que considera a tensão-compressão assimétrica e a deformação plástica que ocorre no comportamento termomecânico das LMF. Este modelo é composto por quatro fases macroscópicas, uma fase austenita e três variações da fase martensita. O modelo também inclui a deformação plástica. A FVM é representada por uma combinação do comportamento cinemático e isotrópico. Além disso, simulações numéricas mostram que o modelo é capaz de determinar o comportamento geral das LMF, permitindo a descrição das características importantes destas ligas como a SE, EMF, entre outras, além da transformação de fase devido à variação da temperatura.

Com a formulação constitutiva da LMF podemos compreender e/ou prever o comportamento das principais características da liga de forma matemática a partir de observações experimentais e utilizando-se os modelos constitutivos citados anteriormente (LAGOUDAS et al., 2008).

## **2.2 Atuadores**

Os atuadores são os “músculos” dos sistemas mecânicos, elementos que convertem a energia armazenada por um sistema em movimento. Diferentes tipos de atuadores são usados como fonte de movimento e força. Os atuadores hidráulicos, pneumáticos e eletromecânicos são chamados de convencionais, pois são usados pela maioria dos sistemas mecânicos. Recentemente, outros tipos de atuadores estão sendo usados para fornecer o movimento e a força necessária para os sistemas mecânicos. Exemplos destes atuadores são as LMF, fluido eletroreológico, transdutores magneto ativos, motores piezelétricos e polímeros eletroativos (GUGLIERI E SARTORI, 2011; MAVROIDIS, PFEIFFER E MOSLEY, 1999; SENTHILKUMAR et al., 2013).

Os atuadores hidráulicos e pneumáticos são considerados máquinas de fluidos, pois usam fluidos para criar movimento mecânico transmitidos por cilindros ou motores, dependendo do tipo de movimento que o atuador necessita. Já os atuadores eletromecânicos convertem energia elétrica em energia mecânica (MAVROIDIS, PFEIFFER E MOSLEY, 1999).

Os atuadores hidráulicos possuem um controle mais apurado da posição e da velocidade, devido ao fato de que o fluido usado não é compressível, normalmente o óleo, possibilitando a transmissão de grande força ao sistema. Os sistemas hidráulicos são muito usados na indústria pela sua habilidade de produzir grande força ou torque com baixa inércia, vibração e choque reduzido. Este sistema possui elevada relação potência transmitida com o seu peso.

A maior desvantagem é a possibilidade de contaminação do sistema, o alto custo de manutenção, além de problemas associados com vazamentos, complexibilidade e inflamabilidade do fluido hidráulico. Outro inconveniente é a defasagem do controle do sistema, devido às linhas de transmissão e a alteração da viscosidade pela temperatura (JELALI E SCHWARZ, 1995; MAVROIDIS, PFEIFFER E MOSLEY, 1999; SENTHILKUMAR et al., 2013).

Os atuadores pneumáticos são os descendentes diretos do sistema hidráulico. A diferença é que o sistema pneumático utiliza um fluido compressível, o ar, como meio de transmissão de energia. Este tipo de sistema de atuação possui menor capacidade de transmissão de força que os sistemas hidráulicos, pois a pressão em suas câmaras é menor.

Porém os sistemas pneumáticos possuem a vantagem de serem mais leves que os sistemas hidráulicos, apesar da sua baixa capacidade de transmissão de força. É um sistema mais limpo e não inflamável, o que torna seu uso em determinados ambientes ideal, como por exemplo em salas limpas, salas de operação, entre outros. Além disto, sua instalação, operação e manutenção são mais fáceis e com custo mais baixo.

A desvantagem é que o sistema tem uma força de atrito elevada, o que acarreta na redução da força de trabalho deste sistema. É também um sistema de atuação não linear, devido ao fluido usado, tornando-o difícil de controlar (MAVROIDIS, PFEIFFER E MOSLEY, 1999; RAHMAT et al., 2011; RICHER E HURMUZULU, 2001).

Os atuadores eletromecânicos são equipamentos elétricos, como motores elétricos, que são usados na atuação de elementos mecânicos, para realizar algum tipo de movimento no processo. Dos sistemas de atuação convencionais, os atuadores eletromecânicos têm a maior variedade de dispositivos e ocupam menores espaços quando comparados com os demais

atuadores convencionais. Tem as vantagens do controle de força e de posição, por sinal elétrico, facilidade de programar seus movimentos e a portabilidade do sistema.

A principal desvantagem deste sistema é que produzem torque muito baixo quando comparados com o seu peso e tamanho, além da possibilidade de travamento de seus elementos durante a falta de força (tensão elétrica no sistema) (CLAEYSSSEN et al., 2010; MAVROIDIS, PFEIFFER E MOSLEY, 1999; SENTHILKUMAR et al., 2013).

### **2.2.1 Atuadores de materiais inteligentes**

Os materiais inteligentes têm demonstrado grande potencial para serem aplicados como atuadores e sensores, devido a suas propriedades únicas e a capacidade de oferecer alta densidade de energia, sendo aplicados em diversos segmentos da indústria, como a automobilística, aeronáutica, dentre outras, e também em estruturas adaptativas (CLAEYSSSEN et al., 2010). O conceito de atuadores de materiais inteligentes abriu novos horizontes em termos de simplicidade de atuação, fabricação de sistemas compactos e poder de miniaturização. Também, têm-se as vantagens de que os mecanismos de atuação são simples, podendo ser dispositivos totalmente elétricos, com pouco ou nenhum hardware adicional. O sistema é silencioso, reduzindo drasticamente o ruído do sistema, e possui baixa tensão de condução.

Dentre os materiais inteligentes, os materiais piezoelétricos foram de grande importância para o desenvolvimento dos atuadores elétricos, principalmente aplicados na redução de ruído e no controle de vibração. Impulsionaram ainda mais o conceito de aeronaves totalmente elétricas, alavancando o desenvolvimento de sistemas de comandos elétricos para substituir os atuadores convencionais.

Atuadores piezoelétricos são capazes de gerar grande força em frequências altíssimas, mas em contrapartida não oferecem uma grande deformação. Uma forma de contornar este problema é empilhando matrizes piezoelétricas, obtendo assim um aumento do seu deslocamento, mas mesmo assim é necessário algum tipo de amplificador de movimento para determinadas aplicações. Este material responde à aplicação de tensão elétrica com a mudança do seu volume, o material se deforma; de forma análoga, quando o material é deformado responde

fornecendo uma tensão elétrica. Este tipo de atuador é muito utilizado em controle de ruído e vibração (CLAEYSSSEN et al., 2010; JANOCHA, 2004).

Outro material inteligente que tem chamado atenção são as ligas de memória de forma magnética, materiais promissores para serem aplicados em atuadores, pois fornecem tensão e frequência de operação relativamente elevadas. As ligas de memória de forma magnética podem recuperar deformações de até 10% quando submetidas a um campo magnético e sua frequência de operação pode alcançar 1 kHz (BORN, 2007; SCHLÜTER, HOLZ, RAATZ, 2012).

Os atuadores magnetostrictivos fornecem um movimento com alta força, apresentando até 0,1% de deformação, com frequência de operação na escala de kHz. São ativados quando expostos a um campo magnético, onde o movimento dos spins deste material provoca a sua deformação (WADLEY, 1996).

Os atuadores de LMF são capazes de sofrer grandes deformações e gerar tensão de recuperação altíssima, mas tem a desvantagem de sua frequência de operação ser muito inferior a dos demais materiais inteligentes (LIANG E ROGERS, 1990). Podem ser de três tipos básicos, baseados no EMF da liga, como mostrado na Figura 2.14.

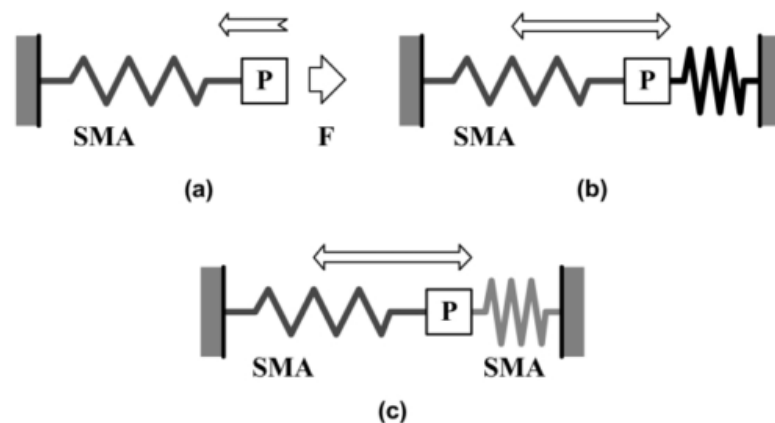


Figura 2.14 – Configurações dos atuadores de LMF. Adaptado de HUANG (2002).

A Figura 2.14 (a) mostra a configuração em que o atuador move o elemento P somente para uma direção, na Figura 2.14 (b) observamos uma configuração em que o atuador utiliza uma mola para mover o elemento P para as duas direções e por fim, a Figura 2.14 (c) em que o

atuador é composto somente por LMF para mover o elemento P. Em todas as configurações apresentadas a LMF é pré-deformada.

Os atuadores de LMF têm a função de substituir os sistemas convencionais que usam engrenagens e servomotores para fornecer o poder de atuação, com o intuito de abrir espaço para dispositivos de controle e aumentar a carga útil (GARNER et al., 2000).

Sua geometria varia entre fios, tubos ou hastes, sendo que os tubos e hastes são usados para atuadores de torque. A LMF na forma de fios é baseada no EMF e é a forma mais utilizada (ROGLIN E HANAGUD, 1996). Já os atuadores na forma de tubos ou hastes sofrem uma pré-torção que, pelas transformações de fase da LMF, quando esta é aquecida, recupera a deformação causada pela pré-torção do tubo. Isso provoca o movimento do elemento a ser atuado, caso este elemento esteja fixo, limitando o movimento de recuperação. Este modelo gera um grande torque de recuperação que, dependendo do sistema de atuação, pode ser necessária. Este tipo de sistema de atuação tem várias aplicações, uma é o controle de vibração de lâminas de rotores de helicópteros (LIANG et al., 1996).

O atuador na forma de haste tem as vantagens de ser mais simples, mais fáceis de se obter e serem rígidos. No entanto, a principal desvantagem é o tempo necessário para aquecer a haste, que aumenta com o quadrado do raio (JARDINE et al., 1996).

Os atuadores de LMF podem ser aplicados na forma de fios na configuração linear como na odontologia ou aplicados na forma de molas, sendo a última a forma mais aplicada dos atuadores de LMF.

Os atuadores são de grande importância para vários sistemas mecânicos. Esta indústria busca de várias formas a redução de peso de suas aeronaves, já que reduzindo o seu peso temos conseqüentemente uma redução no consumo de combustíveis, que acarreta em uma redução drástica no custo operacional da aeronave, além de significar um aumento do seu tempo de voo (SENTHILKUMAR, 2012).

Uma forma de reduzir o peso da aeronave é substituir alguns dos materiais que são usados normalmente em aeronaves por outros materiais, como já vem acontecendo, com a utilização dos materiais compósitos na estrutura da aeronave. Uma possibilidade é a substituição dos

atuadores convencionais, que possuem peso elevado, pelos atuadores de materiais inteligentes. Estes materiais apresentam melhora no desempenho aerodinâmico e eliminam os sistemas de acionamento complexos dos atuadores convencionais.

Dos materiais inteligentes citados, as LMF já são utilizadas pela indústria aeroespacial, como por exemplo, para reduzir o ruído gerado pelas turbinas durante a decolagem e a aterrissagem, como mostrado na Figura 2.15. Para esta aplicação os elementos de LMF são usados para dobrar as bordas em “V” durante o voo a baixa altitude e baixa velocidade de voo, aumentando, assim, a mistura de gases e reduzindo o ruído gerado. Durante velocidades e altitudes de cruzeiro, os componentes de LMF esfriam, alinhado a forma de “V” que resulta no aumento do desempenho do motor (AQUINO, 2011).



Figura 2.15 – LMF (*Shape Memory Alloy* – SMA) usada na redução de ruído da turbina (HARTL et al., 2010).

As LMF também são muito utilizadas em *Morphin* de aeronave, aplicação em que as aeronaves se submetem a certas mudanças de geometria para melhorar ou adaptar o seu perfil na missão de voo (SOFLA et al., 2010).

O presente trabalho apresenta um estudo da aplicação da LMF como atuadores com a função de mover uma das superfícies de controle da aeronave, o *flap*.

# 3

## METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a realização deste trabalho consistiu em caracterizar as propriedades mecânicas e térmicas da LMF de NiTi, aproximadamente equiatômica, por meio do ensaio de tração e da análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC), além de buscar alguns parâmetros do material na literatura. Os parâmetros reunidos foram necessários para utilização dos modelos constitutivos descritos na literatura, usados para prever o comportamento termomecânico do material. A implementação dos modelos constitutivos, permitiu a comparação dos resultados numéricos com os experimentais a fim de definir qual dos modelos foi o mais eficaz, escolhido para ser usado durante o desenvolvimento do trabalho. Um modelo do atuador foi desenvolvido e simulado utilizando o *software* ABAQUS, onde obteve-se as respostas de esforços e deslocamentos do atuador. O perfil de uma asa de aeromodelo também foi simulado.

### 3.1 Projeto do atuador

O atuador proposto foi desenvolvido para ser aplicado em aeronaves, onde sua função é de mover uma das superfícies de comando. As análises dos modelos foram realizadas considerando a aplicação preliminar do atuador em um aeromodelo. Assim, as dimensões do modelo são em escala reduzida.

Um modelo preliminar do atuador na forma de fios foi proposto, considerando as dimensões de um aeromodelo obtidas na literatura (LIMA, 2013). O modelo preliminar considerou o comprimento de corda da asa igual a 30 cm. A superfície de comando avaliada foi o *flap*, com comprimento de 10 cm e altura máxima de 2 cm, como mostrado na Figura 3.1.

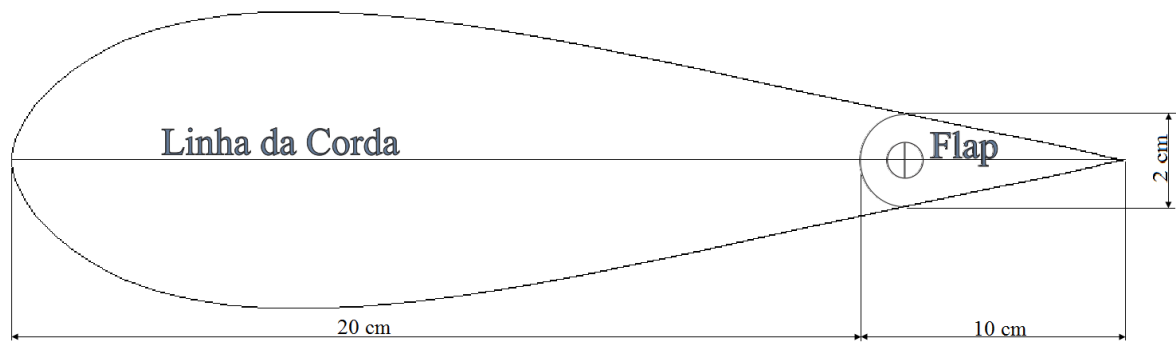


Figura 3.1 – Seção transversal da asa, a qual o modelo preliminar do atuador é baseado.

O modelo do atuador é composto por dois fios de NiTi com diâmetro de 1 mm, que são deformados antes de serem posicionados no sistema. Esta deformação define a quantidade de movimento do sistema, além da tensão gerada pelos fios. Os fios são posicionados de forma antagônica, ou seja, o fio acionado causa deformação no fio adjacente, e vice-versa, como mostrado na Figura 3.2.

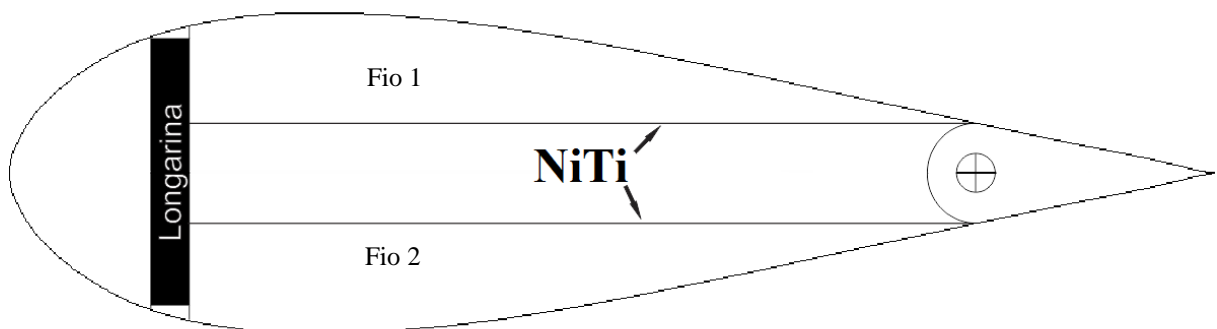


Figura 3.2 – Modelo dos fios atuadores de NiTi.

Os fios de NiTi são presos nas extremidades do sistema. Uma das extremidades dos fios é presa a uma superfície fixa que pode ser a longarina ou a própria estrutura da asa, desde que esta extremidade não se mova. A outra extremidade dos fios é presa no elemento atuado, no caso o *flap*, mas poderia ser qualquer outra das superfícies de comando da aeronave.

O acionamento dos fios é feito por efeito Joule, conectando-os a uma fonte de alimentação de 12 volts.

O princípio de funcionamento do atuador é simples. Acionando o Fio 1 (Figura 3.2) do sistema, este irá aquecer e, quando atingir a temperatura crítica do material, pelo efeito

memória de forma, irá encurtar recuperando parte da sua forma original e causando assim o movimento de giro da superfície de controle no sentido anti-horário (Figura 3.2). Com os fios ligados pela superfície de controle, o movimento traciona o Fio 2, deformando-o com a mesma magnitude da deformação recuperada pelo Fio 1. Acionando o Fio 2, este irá aquecer e, quando atingir a temperatura crítica, recuperará parte da sua forma original mudando a direção de rotação da superfície de comando, causando um movimento de giro no sentido horário no sistema (Figura 3.2). Isso também irá causar uma extensão no Fio 1, que será tracionado com deformação de magnitude igual a da deformação recuperada pelo Fio 2.

A força e o movimento gerados pelos fios atuadores de NiTi são diretamente relacionados com a deformação inicial do fio a ser recuperada. A deformação é influenciada pelo comprimento inicial do fio. Com isso, desenvolveu-se um método matemático para definir o comprimento indeformado do fio baseado na quantidade de giro desejada para o elemento atuado.

A formulação considera o movimento do elemento atuado e o comprimento recuperado do fio. Como o movimento do elemento atuador é circular, a quantidade de giro desejado é definida pelo comprimento de arco e o comprimento recuperado pelo fio é definido pela deformação do fio, como mostrado na Figura 3.3.

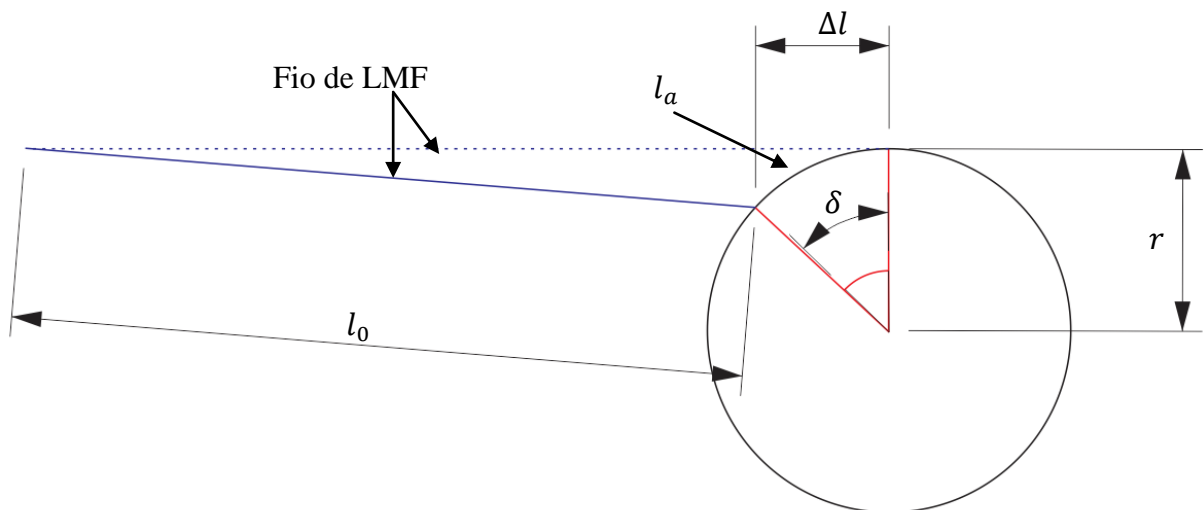


Figura 3.3 – Modelo usado para determinar o comprimento do fio de LMF no estado indeformado.

O comprimento de arco de uma circunferência é definido pela Equação (3.1) e a deformação do fio pela Equação (3.2):

$$l_a = \frac{\pi r \delta}{180} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon^r = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.2)$$

onde  $l_a$  é o comprimento do arco (m),  $r$  é o raio do elemento atuado (m),  $\delta$  é o ângulo de giro desejado (dado em graus)  $\varepsilon^r$  é a deformação recuperável,  $l_0$  é o comprimento do fio indeformado (m) e  $\Delta l$  é o comprimento recuperado pelo fio (m).

Considerou-se que o fio tem trajetória tangencial à circunferência do eixo do elemento atuado, e que a quantidade de giro obtida é igual ao comprimento recuperado pelo fio, como mostrado na Equação (3.3).

$$\Delta l = l_a \quad (3.3)$$

Substituindo as Equações (3.1) e (3.2) na Equação (3.3) obtém-se a Equação (3.4) que descreve o comprimento indeformado do fio de LMF necessário para obter o giro desejado.

$$l_0 = \frac{\pi r \delta}{180 \varepsilon^r} \quad (3.4)$$

Se o ângulo de giro for descrito em radianos, o comprimento do fio indeformado pode ser obtido utilizando a Equação (3.5).

$$l_0 = \frac{r \delta}{\varepsilon^r} \quad (3.5)$$

Com estas equações, pode-se definir o comprimento inicial do fio necessário para gerar um determinado giro durante o acionamento dos fios ou avaliar a quantidade de giro obtida por

um fio com um determinado comprimento inicial, considerando que a deformação do fio constante.

Outra forma de se obter a quantidade de giro gerada pelo fio ou o comprimento inicial é descrita por EPPS E CHOPRA (2001). A Equação (3.6) aproxima o movimento gerado pelo atuador por uma reta, a fim de se formar um triângulo retângulo, como mostrado na Figura 3.4. Com isso, o ângulo de giro pode ser determinado utilizando a relação de seno deste triângulo.

$$\delta \cong \text{sen}^{-1} \left( \frac{l_0 \varepsilon^r}{r} \right) \quad (3.6)$$



Figura 3.4 – Movimento gerado pelo fio de LMF. Adaptado de EPPS e CHOPRA (2001).

Para determinar o comprimento indeformado do fio a ser usado foi necessário definir a quantidade de giro desejada,  $\delta$ , e a deformação recuperável do fio,  $\varepsilon^r$ . A deformação  $\varepsilon^r$  é limitada pela máxima deformação recuperável,  $\varepsilon_L$ , pois deformações maiores que  $\varepsilon_L$  não são recuperadas pelo EMF. Pela forma que os fios atuadores são dispostos no sistema,  $\varepsilon^r$  é limitada à metade do valor de  $\varepsilon_L$ .

Além da formulação usada para definir a quantidade de giro obtida pelo atuador, também foi desenvolvida uma formulação para determinar o tempo aproximado para que o sistema de atuação acione, ou seja, o tempo para que a LMF aqueça e o tempo de resfriamento do sistema de atuação. Considerou-se que o acionamento do atuador ocorre pela passagem de corrente elétrica, e conseqüentemente o aquecimento da LMF é através do efeito Joule. A corrente elétrica no sistema é definida pela Equação (3.7) e a resistência do fio é definida pela Equação (3.8):

$$V = R.I \quad (3.7)$$

$$R = \rho \cdot \frac{l_0}{A} \quad (3.8)$$

onde  $V$  é a tensão elétrica (V),  $I$  é a corrente elétrica (A),  $R$  é a resistência elétrica do fio ( $\Omega$ ),  $\rho$  é a resistividade do material ( $\Omega \text{ m}$ ),  $l_0$  é o comprimento inicial do fio (m) e  $A$  é a área da seção transversal do fio ( $\text{m}^2$ ). A resistividade do material varia com a fase cristalográfica em que a liga se encontra, sendo determinada pela Equação (3.9).

$$\rho = \rho_A + \xi(\rho_M - \rho_A) \quad (3.9)$$

onde  $\rho_A$  é a resistividade do material na fase austenita ( $\Omega \text{ m}$ ) e  $\rho_M$  é a resistividade do material na fase martensita ( $\Omega \text{ m}$ ). O calor necessário para aquecer os fios de LMF pode ser obtido pela Equação (3.10), que relaciona a corrente elétrica no sistema de atuação com o calor gerado pelo mesmo. A Equação (3.11) relaciona a energia calorífica com a variação da temperatura do sistema:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \Delta t \quad (3.10)$$

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (3.11)$$

onde  $Q$  é a quantidade de energia térmica (J),  $\Delta t$  é a variação do tempo que a corrente fica aplicada no fio (s),  $\Delta T$  é a variação da temperatura do fio (K),  $m$  é a massa do fio (kg) e  $c$  é o calor específico do material (J/kg K). A massa dos fios de LMF pode ser obtida pela relação de massa específica do material, apresentada pela Equação (3.12):

$$Me = \frac{m}{v} = \frac{m}{A \cdot l_0} \quad (3.12)$$

onde  $Me$  é a massa específica do material ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) e  $v$  é o volume do fio ( $\text{m}^3$ ).

Aplicando as Equações (3.7) e (3.8) na Equação (3.10) tem-se:

$$Q = \frac{V^2 \cdot A}{\rho \cdot l_0} \cdot \Delta t \quad (3.13)$$

Aplicando a Equação (3.12) na Equação (3.11):

$$Q = Me \cdot A \cdot l_0 \cdot c \cdot \Delta T \quad (3.14)$$

Igualando a Equação (3.13) com a Equação (3.14) obtém-se:

$$\Delta t = \frac{Me \cdot \rho \cdot l_0^2}{V^2} \cdot c \cdot \Delta T \quad (3.15)$$

A Equação (3.15) descreve a função usada para determinar o tempo aproximado para aquecer os fios de LMF pela passagem de corrente elétrica.

Para definir o tempo necessário para resfriar os fios de LMF necessita-se da função que descreve a energia dissipada pelo sistema durante o resfriamento. Como os fios de LMF tem diâmetro muito pequeno considera-se que o seu resfriamento ocorre por convecção, essa função é descrita pela Equação (3.16):

$$P = h \cdot A_C \cdot \Delta T \quad (3.16)$$

onde  $P$  é a potência dissipada por convecção (J/s),  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção (J/sm<sup>2</sup> K),  $A_C$  é a área da superfície que troca calor com o ambiente do fio (m<sup>2</sup>). A potência dissipada por um sistema pode ser determinada pela Equação (3.17):

$$P = \frac{Q}{\Delta t} \quad (3.17)$$

Como a energia que deve ser dissipada para o ambiente é dada pela Equação (3.14), esta deve ser aplicada na Equação (3.17). O resultado obtido foi aplicado na Equação (3.16) resultando em:

$$\Delta t = \frac{Me \cdot A \cdot l_0 \cdot c}{h \cdot A_C} \quad (3.18)$$

A Equação (3.18) descreve a função desenvolvida para determinar o tempo aproximado para que os fios de LMF resfriem até uma determinada temperatura. A temperatura desejada no resfriamento é definida pela quantidade de energia térmica que os fios devem dissipar para o ambiente.

### 3.2 Caracterização da Liga de Memória de Forma

A liga de memória de forma usada no desenvolvimento deste trabalho foi a liga de NiTi, que dentre as demais LMF possui as melhores propriedades mecânicas e térmicas (FUNAKUBO E KENNEDY, 1987). A liga escolhida possui temperatura de transformação  $A_f$  maior que a temperatura ambiente, para que se possa usar o efeito memória de forma do material no sistema de atuação.

Para confirmar a temperatura de transformação  $A_f$  e determinar as demais propriedades térmicas do material, a liga foi submetida ao ensaio térmico de DSC (*Differential Scanning Calorimetry* ou Calorimetria Exploratória Diferencial). O ensaio foi realizado em um equipamento de DSC, modelo Shimadzu DSC 60 fabricado pela empresa Shimadzu em Kyoto, Japão. Este equipamento usa a mudança de capacidade térmica do material para determinar as temperaturas de início e fim das transformações em que o material absorve ou emite grande quantidade de calor com uma pequena mudança de temperatura (CHOPRA, 2002).

O teste foi feito usando uma pequena quantidade de amostra da LMF livre de tensões juntamente com uma amostra de referência no equipamento de DSC a uma taxa de aquecimento e resfriamento de 10 °C/min. Com os dados registrados pelo DSC gera-se um diagrama fluxo de calor em função da temperatura. A Figura 3.5 mostra como seria um diagrama de DSC ideal para uma LMF. Com a curva gerada pelo DSC, desenha-se linhas de base e, logo após, as linhas tangentes aos picos de aquecimento e resfriamento através dos pontos de inflexão. As temperaturas de transformação são obtidas pela intersecção da linha de base do gráfico com o prolongamento da linha de inclinação máxima do pico, (linhas tangentes, Figura 3.5). Os picos mostrados no gráfico são referentes ao calor latente de transformação devido à transformação de fase entre austenita e martensita na LMF. A absorção de energia devido à transformação de fase em amostras resulta em um pico endotérmico no aquecimento, e a liberação de energia devido à transformação de fase em

amostras resulta em um pico exotérmico no resfriamento (RAO, SRINIVASA E REDDY, 2015).

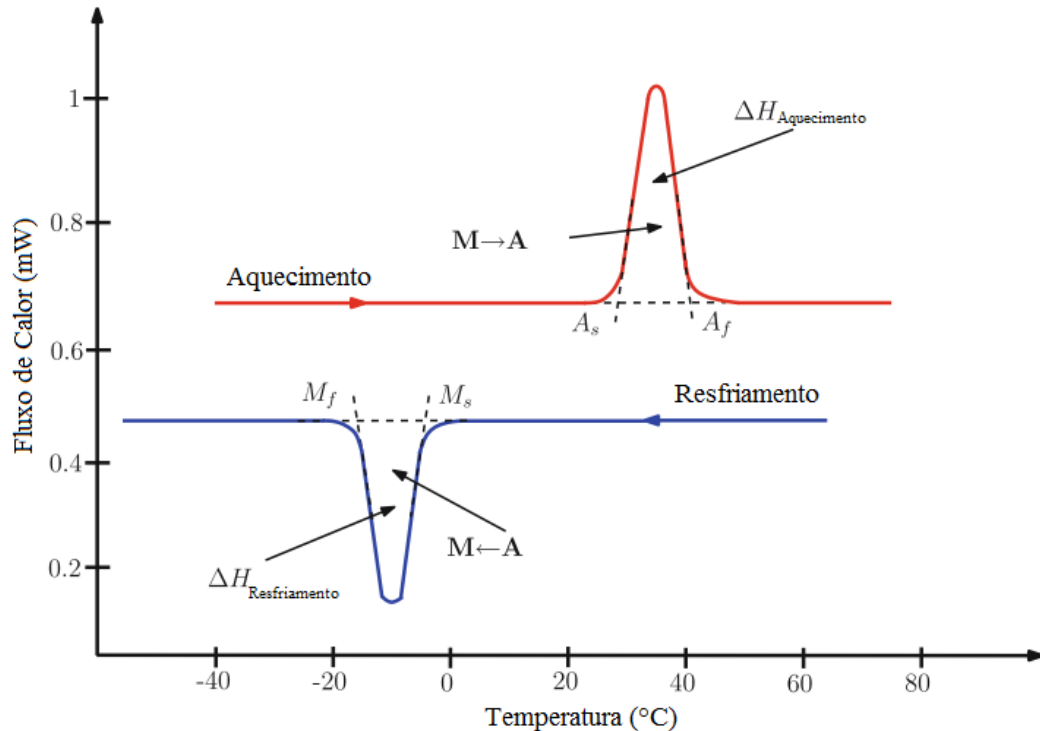


Figura 3.5 – DSC ideal para uma LMF (RAO, SRINIVASA E REDDY, 2015).

Os picos endotérmicos e exotérmicos são característicos de qualquer transformação de primeira ordem, como a fusão do gelo (sólido para líquido), evaporação da água (líquido para vapor), *etc.* No caso das LMF são referentes à transformação de fase no estado sólido, sendo o DSC um método rápido de determinar as temperaturas de transformação de fase da liga de NiTi (CHOPRA, 2002).

A liga usada também foi submetida ao ensaio de tração em temperatura ambiente, para determinar algumas de suas propriedades mecânicas. O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios Instron 5582 fabricada pela Instron, Norwood, MA, EUA. O teste foi feito usando uma amostra do fio de LMF de seção circular, com diâmetro de 1 mm e comprimento útil de 15 cm, submetida à tração até a ruptura. O sistema de aquisição de dados registra a tensão no fio e a deformação causada. A partir dos resultados do ensaio pôde-se determinar algumas das propriedades da liga em questão, como os módulos de elasticidades das fases do material, a máxima deformação recuperável, as tensões em que as fases do

material deixam de ser estáveis, e a tensão de escoamento do material (RAO, SRINIVASA E REDDY, 2015).

A Figura 3.6 mostra um gráfico típico de tensão *versus* deformação obtida pelo ensaio de tração da LMF. A figura também mostra como os dados apresentados devem ser tratados. O gráfico representa somente a região elástica do diagrama tensão - deformação da LMF. Dentro da região elástica observamos um patamar separando o diagrama em duas regiões distintas, onde ocorre a reorientação da fase martensita induzida pela tensão, no EMF, ou a transformação de fase induzida pela tensão, na SE. A medida da inclinação da curva tensão *versus* deformação no início do carregamento, antes deste patamar, representa o módulo de elasticidade da fase austenita,  $E_A$ , e a medida da inclinação da curva tensão *versus* deformação no início do descarregamento, após o patamar, representa o módulo de elasticidade da fase martensita,  $E_M$ . A máxima deformação recuperável,  $\epsilon_L$ , é a deformação limitada pelos módulos de elasticidade da liga (CHOPRA, 2002; LAGOUDAS et al., 2003).

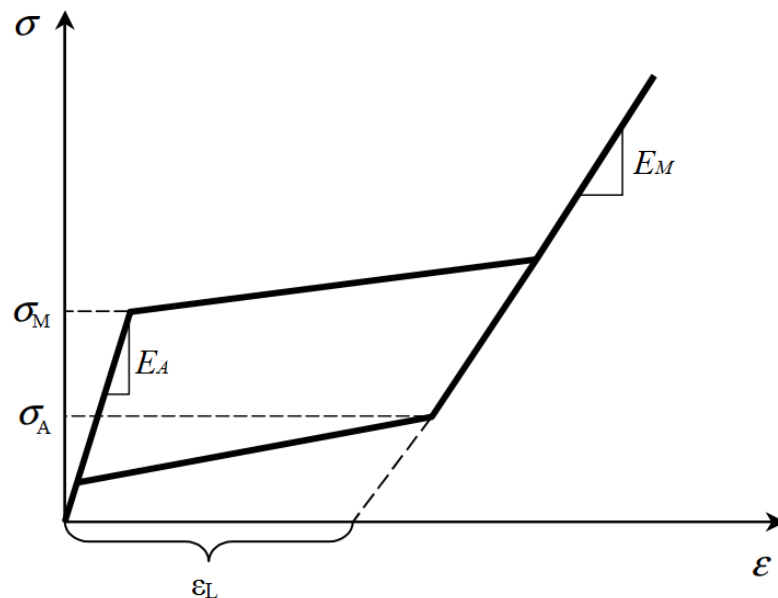


Figura 3.6 – Gráfico tensão *versus* deformação da Superelasticidade da LMF (LAGOUDAS et al., 2003).

A tensão no início do patamar no carregamento representa a tensão em que ocorre transformação no material, no EMF. Esta tensão indica o início da reorientação e demacção da martensita, representada na Figura 3.6 por  $\sigma_M$ . A tensão no início do patamar de

descarregamento representa a tensão em que ocorre a transformação de martensita em austenita, só observada na SE, e é representada na Figura 3.6 por  $\sigma_A$ .

Com os parâmetros descritos acima e a temperatura em que o ensaio foi realizado ( $T_{teste}$ ) podemos determinar o coeficiente de influência da tensão para as fases austenita,  $C_A$ , e para a fase martensita,  $C_M$ , respectivamente utilizando as Equações (3.19) e (3.20) (LAGOUDAS et al., 2003).

$$C_A = \frac{\sigma_A}{T_{teste} - A_s} \quad (3.19)$$

$$C_M = \frac{\sigma_M}{T_{teste} - M_s} \quad (3.20)$$

O material usado no estudo foi submetido aos ensaios descritos acima, e os parâmetros obtidos por estes ensaios foram usados nos modelos constitutivos da LMF. Além dos parâmetros apresentados, outros parâmetros do material são usados nas análises, que são a massa específica,  $Me$ , os coeficientes de expansão térmica da fase austenita,  $\alpha_A$ , e da fase martensita,  $\alpha_M$ , o coeficiente de Poisson,  $\nu$ , o calor específico,  $c$ , e a condutividade térmica,  $C$ , obtidos na literatura.

### 3.3 Análises numéricas

Os modelos de atuadores propostos (Item 3.1) foram analisados numericamente, utilizando o método dos elementos finitos. Para estas análises utilizou-se o *software* comercial ABAQUS/Standard, avaliando-se os esforços aos quais os fios atuadores estão submetidos durante o seu acionamento, além de verificar o movimento obtido pelo atuador.

As LMF possuem o comportamento constitutivo não linear, impossibilitando o uso dos modelos de materiais disponíveis pelo *software* para descrever o comportamento do material. Porém, o *software* oferece a possibilidade de implementar modelos constitutivos de materiais não lineares, a “*user material subroutine*” ou UMAT. Esta sub-rotina é usada para definir qualquer modelo constitutivo complexo que nenhum dos modelos incluídos na biblioteca de materiais do ABAQUS/Standard represente com precisão.

A UMAT é chamada em todo o cálculo de pontos materiais do elemento, ao qual o comportamento do material é definido pelo usuário, podendo-se usar variáveis de estado dependente da solução, atualizar as tensões e as variáveis de estado de solução dependente ao final de cada incremento que é chamado e fornecer a matriz jacobiana do material para o modelo constitutivo (HIBBITT et al., 2010; HIBBITT, 2005).

Quando a sub-rotina é chamada, fornece o estado do material no início do incremento, tal como a tensão, as variáveis dependentes da solução, a temperatura, a deformação, *etc.*, junto com os incrementos de temperatura e deformação. As saídas da sub-rotina são os valores atualizados dos tensores de tensão e da rigidez tangente, bem como os valores das variáveis dependentes da solução (HIBBITT, 2005). O método de Newton-Raphson é usado como solução do sistema de equações em análises de materiais com comportamento constitutivo não-linear (LAGOUDAS et al., 2003).

O *software* ABAQUS/Standard possui uma sub-rotina implementada que pode ser usada para descrever o comportamento de LMF, com o modelo constitutivo usado nesta sub-rotina foi proposto por AURICCHIO E PETRINI (2004) para descrever o comportamento constitutivo na SE. O sistema de atuação proposto no projeto é baseado no EMF da liga, sendo esta sub-rotina não é indicada para avalia-lo, por este motivo necessitamos de outra UMAT para descrever o comportamento constitutivo termomecânico do material.

A sub-rotina UMAT usada nas análises dos fios atuadores de LMF foi a SMA\_UM (*Shape Memory Alloy - Unified Model*), disponibilizada pelo Departamento de Engenharia Aeronáutica da Universidade do Texas (LAGOUDAS et al., 2008). A rotina SMA\_UM descreve o comportamento constitutivo da LMF tanto para o EMF quanto para a SE, ou seja, a rotina pode descrever o comportamento termomecânico da LMF em qualquer temperatura ou estado de tensão.

A SMA\_UM é um código computacional desenvolvido na linguagem de programação FORTRAN que implementa modelos constitutivos para a LMF. Na versão usada desse código é implementado o modelo constitutivo unificado apresentado por LAGOUDAS, BO E QIDWAI (1996). O modelo constitutivo citado apresenta uma fórmula geral do modelo termodinâmico, baseado no modelo de BOYD E LAGOUDAS (1996) e unifica os modelos de TANAKA (1986) e LIANG E RORGERS (1990) no âmbito do modelo termodinâmico. Além

de unificar estes modelos, a formulação apresentada por Lagoudas e seus colaboradores generaliza-os para realizar análises tridimensionais, uma vez que estes modelos são desenvolvidos para análises unidimensionais. A necessidade de realizar-se análise de elementos finitos nas três dimensões é a diversificação das aplicações das LMF, por exemplo, como atuadores de tubos de torque em asa inteligente, onde as respostas das análises unidimensionais, desenvolvidas pelos modelos constitutivos clássicos, não são satisfatórias (LAGOUDAS, BO E QIDWAI, 1996; QIDWAI E LAGOUDAS, 2000).

O modelo foi numericamente implementado usando um algoritmo de mapeamento de retorno, que é detalhado por QIDWAI E LAGOUDAS (2000). A sub-rotina foi implementada seguindo as especificações da UMAT do *software* ABAQUS/Standard, já que esta é desenvolvida para ser usada nesta plataforma. Contudo, nada impede que esta seja usada em qualquer outro programa de elementos finitos.

Todas as propriedades da LMF apresentadas anteriormente são parâmetros de entrada da sub-rotina SMA\_UM, lembrando que os parâmetros dos materiais podem ser expressos em qualquer sistema de unidades, desde que haja consistência. Contudo, os parâmetros que envolvem temperatura devem ser expressos em Kelvin (K).

As propriedades da LMF usada pela sub-rotina SMA\_UM são: módulo de elasticidade da fase austenita e da fase martensita,  $E_A$  e  $E_M$ , respectivamente, coeficiente de expansão térmica  $\alpha_A$  e  $\alpha_M$ , as temperaturas de transformação  $M_s$ ,  $M_f$ ,  $A_s$  e  $A_f$ , a máxima deformação recuperável,  $\varepsilon_L$ , e os coeficientes de tensão  $\rho\Delta s^A$  e  $\rho\Delta s^M$ , que podem ser determinados usando as Equações (3.21) e (3.22) (LAGOUDAS, BO E QIDWAI, 1996).

$$\rho\Delta s^A = -C_A \varepsilon_L \quad (3.21)$$

$$\rho\Delta s^M = -C_M \varepsilon_L \quad (3.22)$$

Além dos parâmetros do material, as condições iniciais e o modelo constitutivo usado na análise também são considerados pela sub-rotina. Estes parâmetros devem ser inseridos no *software* ABAQUS/Standard em uma sequência específica, que é mostrada na Tabela 3.1, juntamente com a descrição do parâmetro de entrada.

Tabela 3.1 – Sequência para inserção de parâmetros no *software* ABAQUS/Standard.

Parâmetro	Descrição
IPHASE	Fase do material: 1 - austenita e 2 – martensita
MODEL	Modelo constitutivo: 1 - Tanaka (1986), 2 - Boyd e Lagoudas (1996a) e 3 - Liang e Rorgers (1990)
TOL	Tolerância do critério de convergência.
xio	Valor inicial da fração volumétrica da martensita.
NELMTP	Número de pontos de integração
EA	Módulo de elasticidade da fase austenita
EM	Módulo de elasticidade da fase martensita
nu	Poisson
alphaA	Coefficiente de expansão térmica da austenita
alphaM	Coefficiente de expansão térmica da martensita
Ms	Temperatura inicial da transformação martensita
Mf	Temperatura final da transformação martensita
As	Temperatura inicial da transformação austenita
Af	Temperatura final da transformação austenita
$\epsilon_L$	Máxima deformação recuperável
$\rho\Delta s^M$	Coefficiente de influência da tensão da fase martensita
$\rho\Delta s^A$	Coefficiente de influência da tensão da fase austenita
epstr11	Valor inicial da componente 11 do tensor de deformação
epstr22	Valor inicial da componente 22 do tensor de deformação
epstr33	Valor inicial da componente 33 do tensor de deformação
epstr23	Valor inicial da componente 23 do tensor de deformação
epstr13	Valor inicial da componente 13 do tensor de deformação
epstr12	Valor inicial da componente 12 do tensor de deformação
FRULE	Tensor de transformação que determina a direção da deformação

### 3.4 Modelos Numéricos

#### 3.4.1 Validação

A validação da sub-rotina usada nas análises é de extrema importância, pois deve-se confirmar se os resultados obtidos nas simulações numéricas são coerentes com resultados experimentais. Para validar-se a sub-rotina SMA\_UM utilizou-se um modelo simples que representou o ensaio de tração do fio.

A geometria do modelo usado na validação é apresentada na Figura 3.7, em que o modelo possui seção transversal quadrada com aresta igual a 1 mm e um comprimento de 150 mm.

Como condição de contorno, a barra é engastada em uma de suas extremidades (Figura 3.8). O carregamento aplicado no modelo é na extremidade livre (Figura 3.9). A magnitude do carregamento usado foi de 100 N. A temperatura do modelo foi definida como sendo 300 K (27°C), que influencia a resposta obtida do modelo constitutivo termomecânico da LMF.

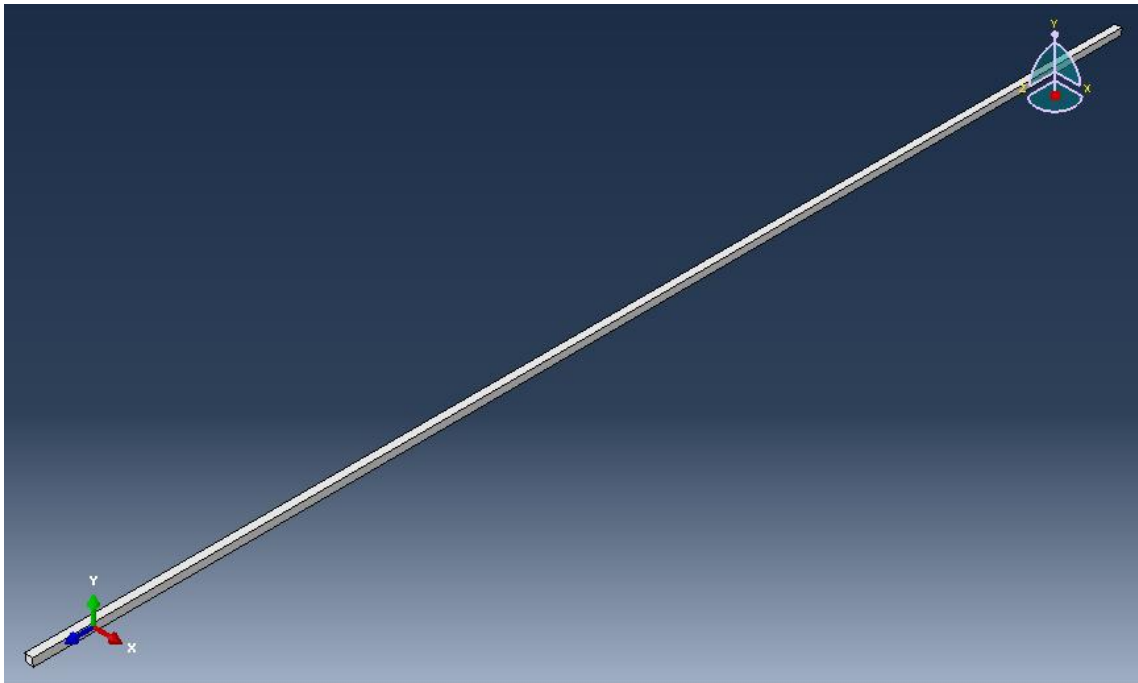


Figura 3.7 – Modelo usado na validação da sub-rotina SMA\_UM (ABAQUS/Standard).

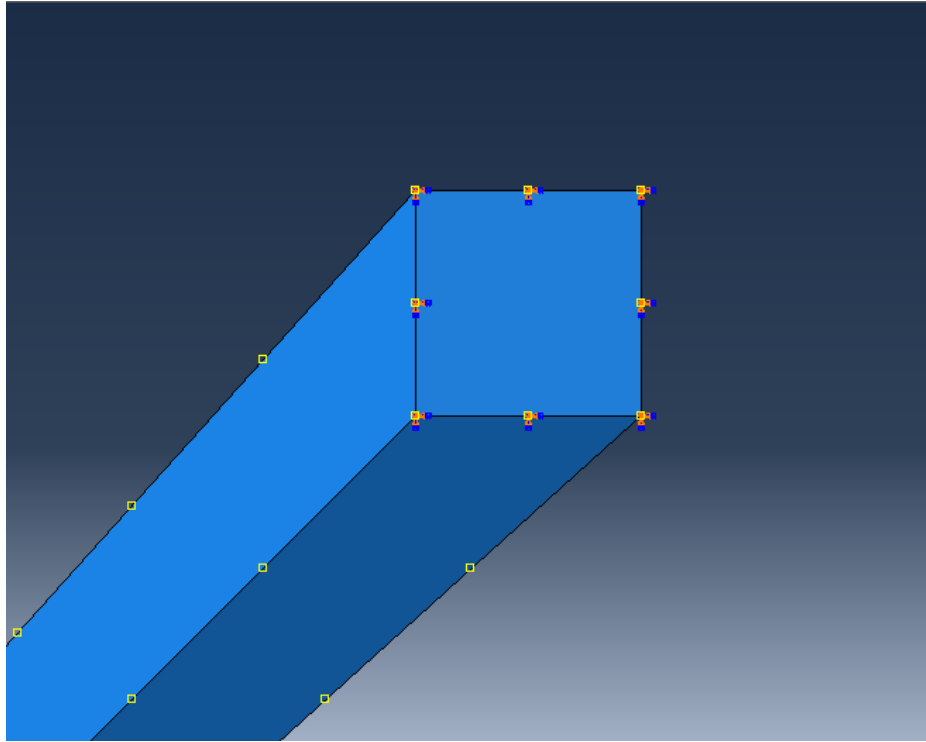


Figura 3.8 – Condição de contorno do modelo de validação (ABAQUS/Standard).

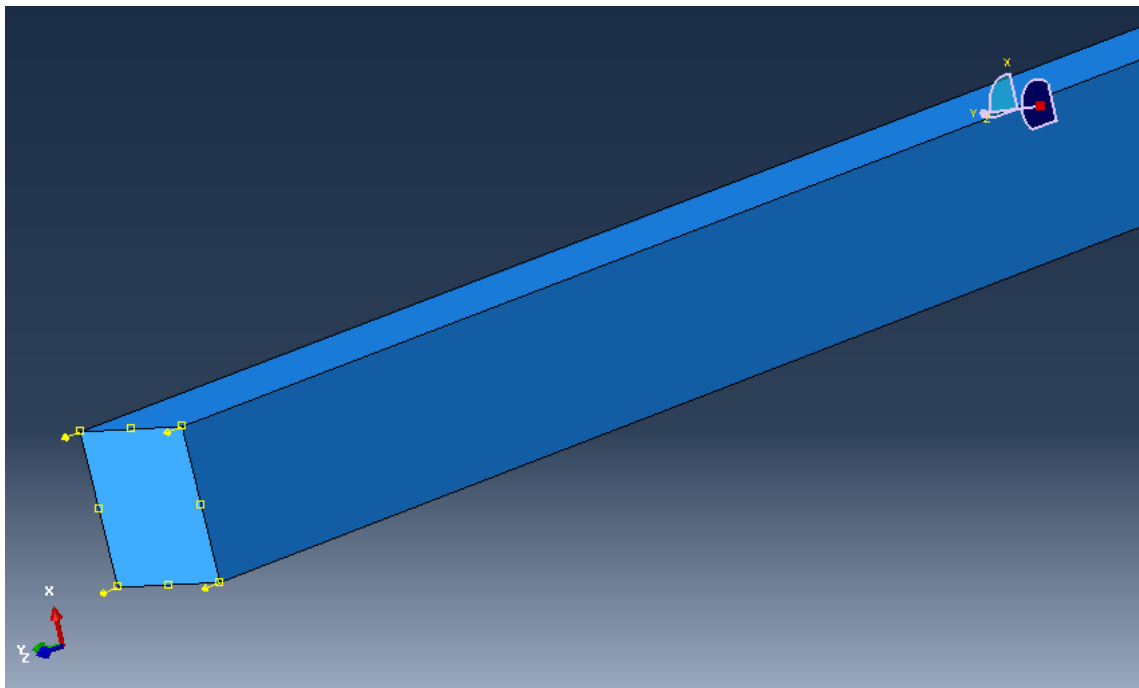


Figura 3.9 – Condição de carregamento do modelo de validação (ABAQUS/Standard).

A discretização do modelo de validação foi feita usando o elemento C3D8 do ABAQUS/standard, que é um elemento de oito nós linear, como mostrado na Figura 3.10.

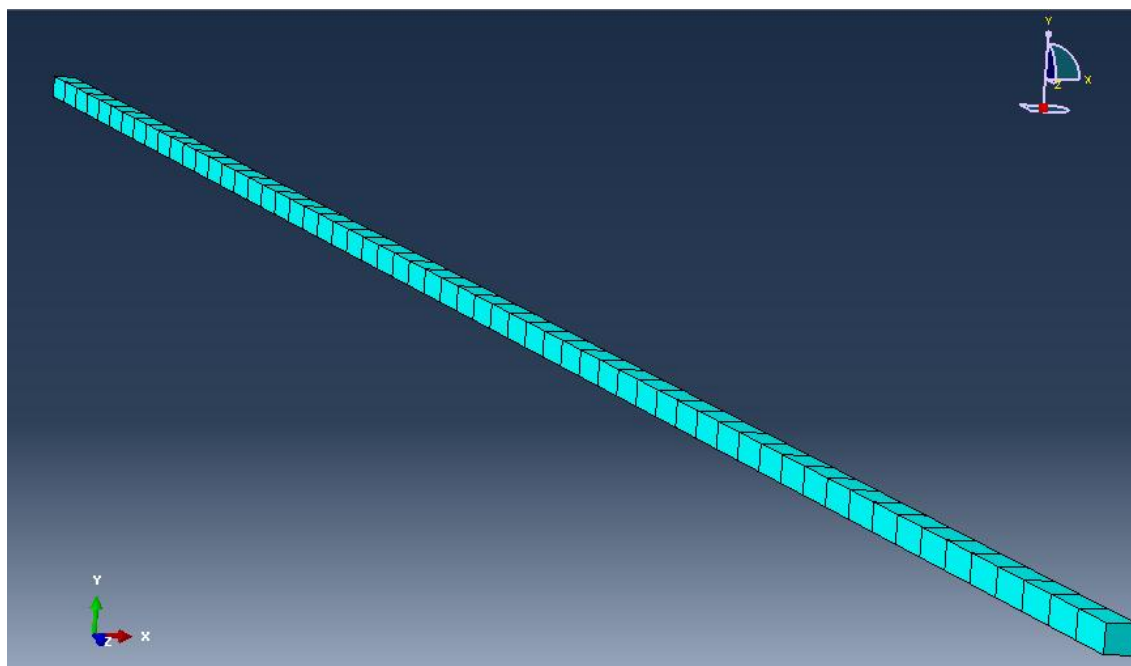


Figura 3.10 – Discretização do modelo de validação (ABAQUS/Standard).

O modelo de validação foi avaliado para todos os três modelos constitutivos termomecânicos que a sub-rotina SMA\_UM descreve. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados experimentais, a fim de se avaliar qual dos modelos foi mais apropriado para ser usado na análise dos fios atuadores.

### 3.4.2 Modelo preliminar do atuador

O modelo preliminar do atuador simulado pelo *software* ABAQUS/Standard foi baseado no projeto do atuador apresentado na Figura 3.2. O modelo simulado é constituído de duas partes: a primeira representa os fios de memória de forma e a segunda representa o elemento atuado, no caso um *flap* de aeronave.

O modelo foi analisado no plano (modelo bidimensional) em que se considera os fios como elementos de treliça unidirecionais, já que os fios de memória de forma sofrem somente esforços axiais de tração.

Levando em consideração as dimensões do perfil da asa e a forma com que os fios são posicionados no interior da asa, determinou-se o comprimento indeformado do fio de memória de forma utilizando a Equação (3.4). Para o modelo preliminar considerou-se que o giro desejado pelo atuador é de  $20^\circ$  (0,35 rad) e que a deformação inicial recuperável do fio é

de 0,024 (2,4%). Com isso determinou-se o comprimento indeformado do fio necessário para o modelo, que é de 16 cm.

Os fios de LMF foram conectados nas extremidades do *flap* nos pontos (b) e (d), como mostrado na Figura 3.11. Nos pontos (a), (c) e (e) são localizadas as condições de contorno do modelo, sendo que no primeiro e terceiro ponto o modelo foi engastado, restringindo qualquer movimento do fio, e no segundo o movimento é restringido nas dimensões dos eixos cartesianos x e y, mas permitindo o giro neste ponto, como mostrado na Figura 3.12.

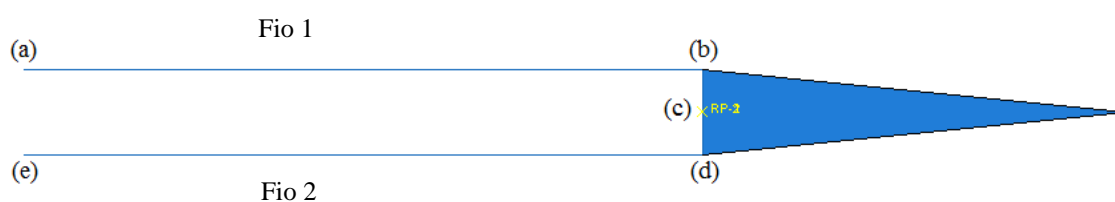


Figura 3.11 – Modelo do atuador desenvolvido no *software* ABAQUS/Standard.

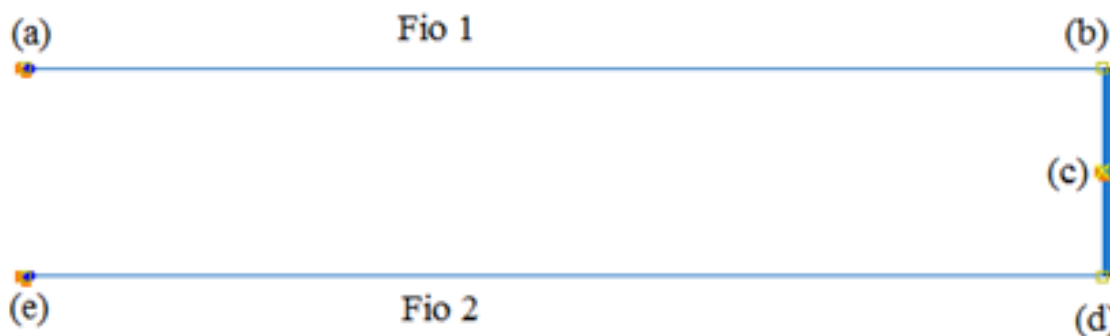


Figura 3.12 – Condições de contorno do modelo do atuador.

Como o *flap* não deve se deformar durante o acionamento dos fios de LMF, este foi modelado como um corpo rígido, para que a distância entre os pontos (b) e (d) não se altere durante a simulação.

O modelo foi discretizado utilizando dois tipos de elementos do ABAQUS/Standard. Os fios de LMF foram discretizados utilizando o elemento T2D2, que é um elemento de treliça linear

de dois nós. O *flap* foi discretizado usando o elemento CPS4, que é um elemento bilinear de quatro nós quadrilateral no plano de tensões. O modelo discretizado é apresentado na Figura 3.13.

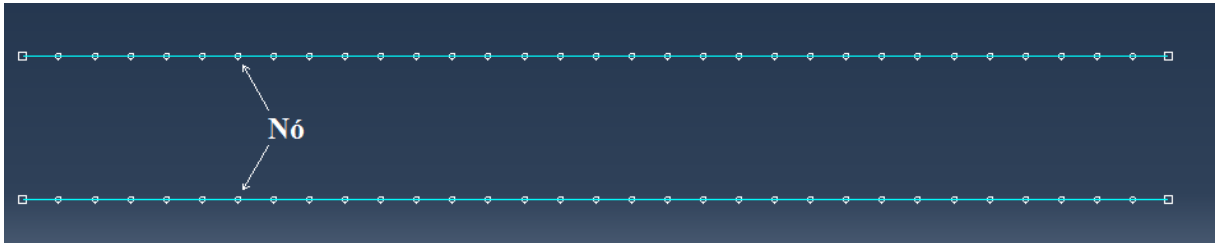


Figura 3.13 – Malha do sistema de atuação.

A simulação do modelo foi feita da seguinte forma: (i) primeiro os fios foram tracionados a fim de causar a deformação inicial desejada, com uma força de 88 N aplicada nos pontos (b) e (d) simultaneamente, como mostrado na Figura 3.14, (ii) depois os fios foram submetidos a ciclos térmicos, onde um dos fios permanece a 300 K (27°C) enquanto o outro fio é aquecido até atingir 371 K (98°C).

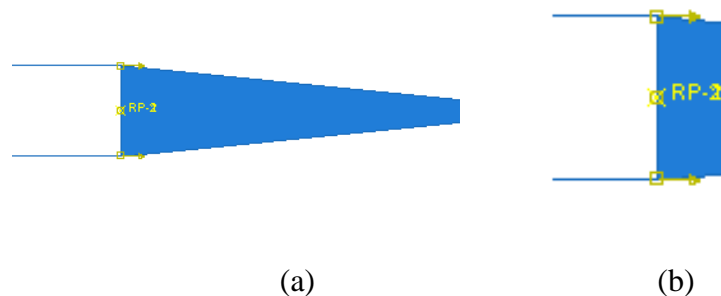


Figura 3.14 – (a) Carregamento aplicado nos fios para obter a deformação inicial desejada.

(b) Ampliação do carregamento.

Com os resultados da simulação do modelo pôde-se avaliar o movimento gerado pelo atuador, o giro obtido durante o acionamento dos fios e a tensão gerada pelos fios atuadores, o que será apresentado na próxima seção.

O outro modelo simulado foi baseado no perfil da asa de um aeromodelo, como mostrado na Figura 3.15. A geometria do modelo preliminar foi modificada para atender às limitações. Primeiro determinou-se a posição onde os fios atuadores seriam fixados definindo-se então o comprimento entre a longarina e o *flap*, elemento atuado. Outros aspectos do modelo, como as

condições de contorno, o carregamento e os elementos usados na discretização das partes do modelo foram mantidos iguais aos do modelo preliminar.



Figura 3.15 – Asa usada como base para o modelo.

O comprimento indeformado do fio foi definido como sendo 13,5 cm. As deformações recuperáveis ( $\epsilon^r$ ) aplicadas nos fios de LMF foram de 1,0%, 1,5%, 2,0% e 2,4%. A geometria do *flap* simulado também foi alterada, modificando-se somente a altura do *flap* e a distância entre os pontos (b) e (d) (Figura 3.11) para 9 mm. O ângulo de giro máximo que o modelo pode alcançar utilizando-se estes parâmetros foi calculado pelas Equações (3.4) e (3.6) e comparado com os resultados obtidos pelo *software* ABAQUS/Standard.

Comparou-se o giro calculado com o giro obtido pela simulação e avaliou-se a tensão gerada pelos fios de LMF durante o processo de atuação, associando-o com a sua deformação recuperável.

# 4

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização do Material

A LMF usada no desenvolvimento deste trabalho é a liga NiTi, que foi caracterizada mecânica e termicamente, para se obter os parâmetros necessários para as análises do sistema de atuação proposto. O resultado da análise térmica de DSC é apresentado na Figura 4.1, onde se obteve as temperaturas de transformação de fase da liga NiTi.

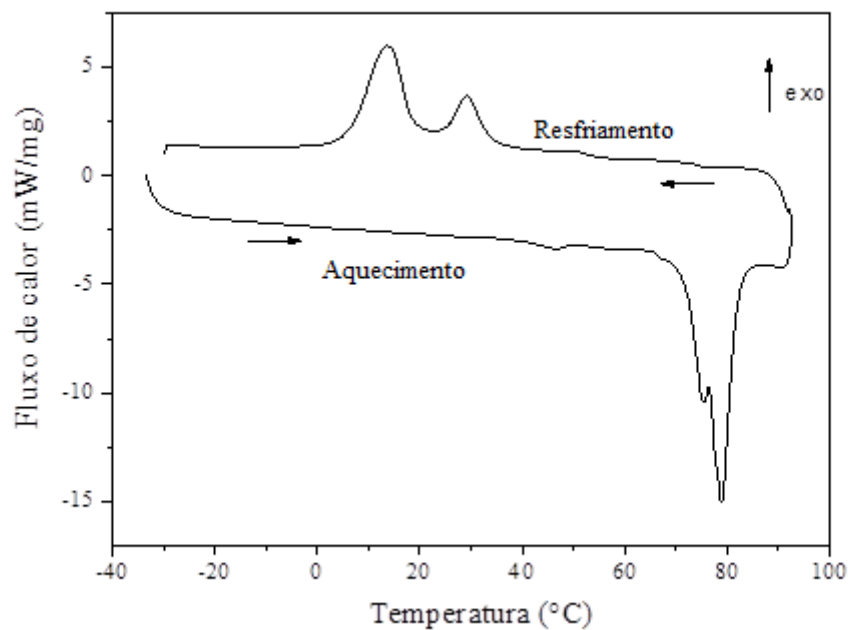


Figura 4.1 – Resultados experimentais do DSC da liga NiTi.

Os picos no gráfico representam as transformações de fase do material. Durante o aquecimento, observa-se um pico endotérmico que indica o momento da transformação do material da fase martensita para a fase austenita. No resfriamento, observa-se dois picos exotérmicos, mostrando que o material em questão apresenta transformação de fase R, onde  $R_s$  e  $R_f$  respectivamente representam as temperaturas de início e de fim da transformação de fase R. O pico exotérmico à direita no resfriamento representa a transformação de fase R e o pico exotérmico à esquerda representa a transformação para a fase martensítica. As temperaturas de transformação de fase deste material são determinadas pelas temperaturas de início e de fim dos eventos endotérmico e exotérmicos da análise de DSC, apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros obtidos pela análise de DCS da liga NiTi.

Parâmetros	Magnitude (°C)	Magnitude (K)
$A_s$	74,67	347,82
$A_f$	81,82	354,97
$R_s$	33,87	307,02
$R_f$	24,83	297,98
$M_s$	18,30	291,45
$M_f$	6,25	279,40

Algumas propriedades mecânicas do NiTi foram definidas pelo ensaio de tração. A Figura 4.2 mostra o resultado do ensaio de tração da liga NiTi, na qual observa-se as regiões elásticas e plásticas da liga. A região elástica possui um patamar que representa o momento da sua transformação microestrutural, além de sua deformação elástica total que pode chegar até 8%.

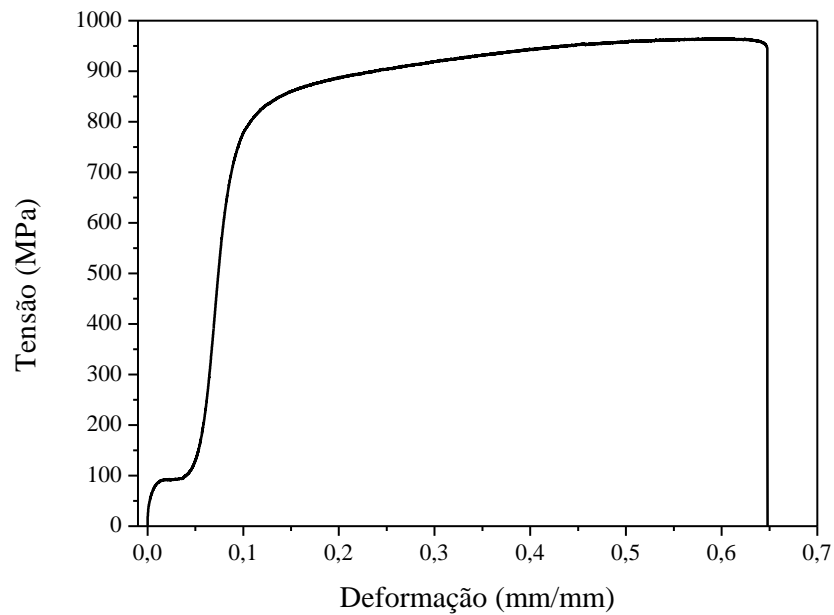


Figura 4.2 – Resultado experimental do ensaio de tração.

A Figura 4.3 – Módulo de elasticidade da fase austenita. Figura 4.3 mostra como o módulo de elasticidade da fase austenita foi obtido, a partir da inclinação inicial da reta tensão *versus* deformação. A Figura 4.4 mostra como o módulo de elasticidade da fase martensita foi obtido, a partir da inclinação da reta depois do patamar do gráfico tensão *versus* deformação.

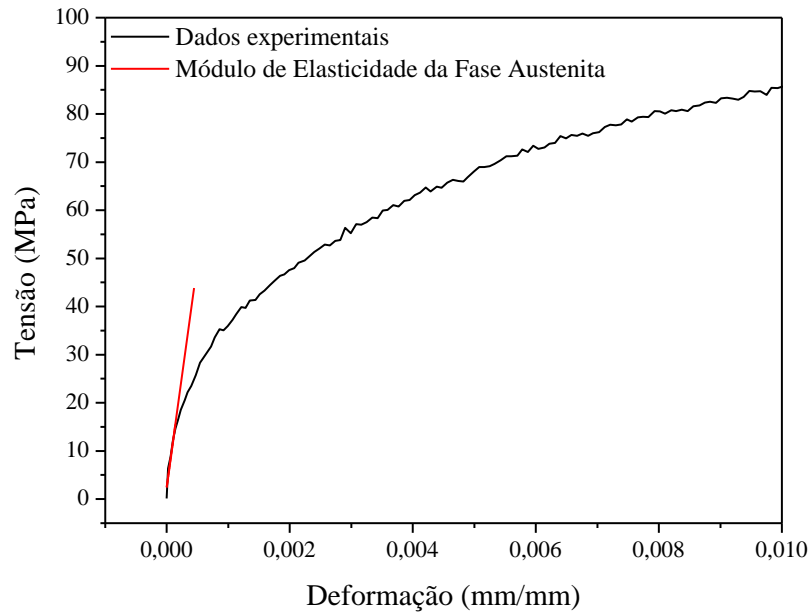


Figura 4.3 – Módulo de elasticidade da fase austenita.

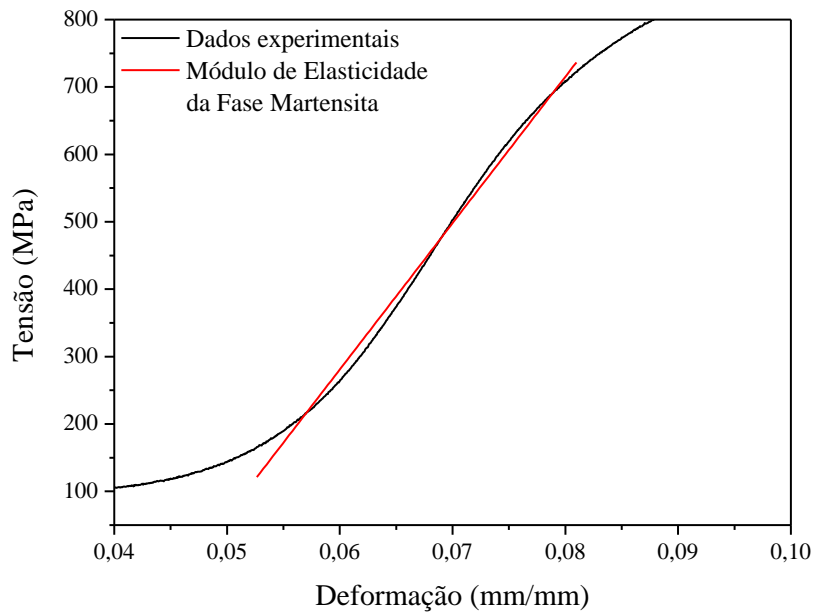


Figura 4.4 – Módulo de elasticidade da fase martensita.

As propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio de tração são listadas na Tabela 4.2, onde a magnitude dos módulos de elasticidade, máxima deformação recuperável e da tensão de transformação da fase martensita são apresentados.

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas da liga NiTi obtidas pelo ensaio de tração.

Propriedade	Magnitude
$E_A$	93,35 GPa
$E_M$	21,71 GPa
$\varepsilon_L$	0,047428
$\sigma_M$	87,25 MPa

A partir do valor de  $\sigma_M$ , obtido pelo gráfico tensão *versus* deformação, e a temperatura em que o ensaio foi realizado, pôde-se calcular o valor de  $C_M$  utilizando-se a Equação (3.20). Encontrou-se um valor de aproximadamente 8,00 MPa/K. Para os modelos constitutivos desenvolvidos pela sub-rotina SMA\_UM utilizada, pode-se aproximar os valores de  $C_M$  e  $C_A$ , considerando-os iguais.

## 4.2 Validação

Os parâmetros apresentados na Tabela 4.1 e Tabela 4.2 foram usados para validar a sub-rotina SMA\_UM. Além dos parâmetros obtidos pelos ensaios também se usou alguns obtidos na literatura, os quais são exigidos para implementação da sub-rotina. Estes parâmetros são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Parâmetros obtidos na literatura e usados na sub-rotina SMA\_UM.

Parâmetros	Magnitude
$\alpha_A$	$11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
$\alpha_M$	$7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
$Me$	$6450 \text{ kg/m}^3$
$\nu$	0,33

Fonte: CHOPRA (2002); RAO, SRINIVASA E REDDY (2015); UCHIL et al. (1999).

Os resultados obtidos para a validação são apresentados na Figura 4.5, onde se observa os resultados das simulações numéricas para os modelos constitutivos desenvolvidos pela sub-rotina, comparados com os resultados experimentais. Pode-se perceber que os modelos constitutivos implementados pela sub-rotina SMA\_UM apresentam comportamento distintos, principalmente o modelo de Tanaka, que é o modelo que apresenta a maior disparidade com os resultados experimentais. Mesmo com alguma discrepância, as simulações numéricas conseguem captar o comportamento do material.

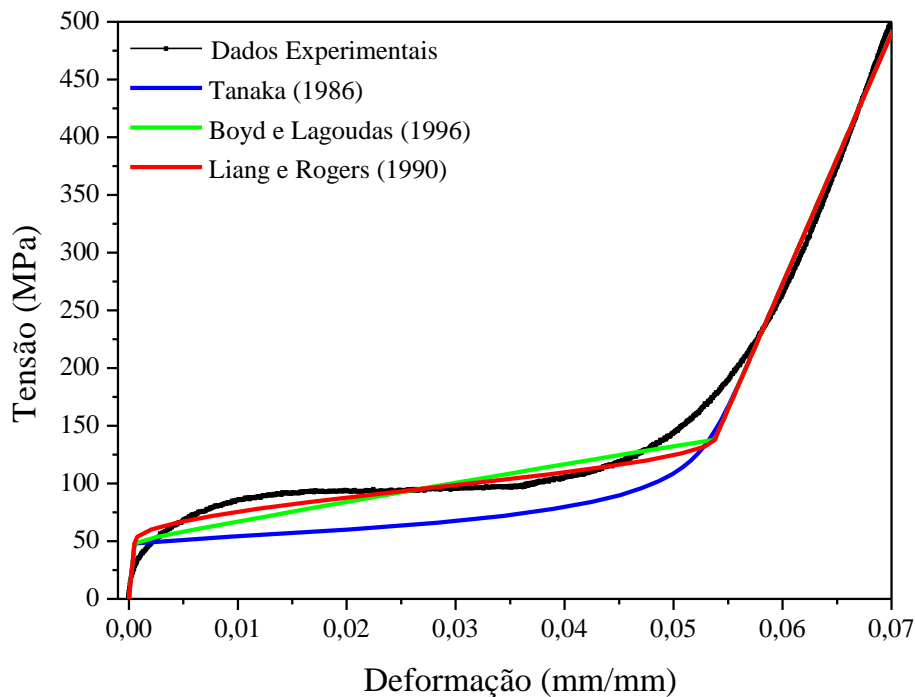


Figura 4.5 – Resultados da validação da sub-rotina SMA\_UM.

Comparando os resultados obtidos para cada modelo pôde-se observar que os modelos constitutivos de BOYD E LAGOUDAS (1996) e LIANG E RORGERS (1990) apresentam uma proximidade bem maior com os resultados experimentais que o modelo de TANAKA (1987), fazendo com que estes modelos sejam mais indicados para serem usados na análise do atuador de liga NiTi.

Comparando-se o comportamento dos modelos de BOYD E LAGOUDAS (1996) e LIANG E RORGERS (1990), durante a análise da validação, observa-se que o primeiro modelo apresentou problema de convergência durante as análises, principalmente para temperaturas

menores que 296 K. Por este motivo, o modelo LIANG E RORGERS (1990) foi escolhido para realizar as análises do atuador de liga NiTi.

### 4.3 Resultados das Análises Numéricas do Atuador Preliminar

Como os fios são termicamente ativados, é necessário avaliar a relação do tempo de acionamento com a temperatura obtida para cada fio de liga NiTi. A Figura 4.6 mostra a sequência de acionamento dos fios, onde é possível observar, na marca de 2 segundos, o acionamento do Fio 1, e que após 1 segundo (na marca de 3 segundos) há o acionamento do Fio 2, com respectivo aumento das temperaturas.

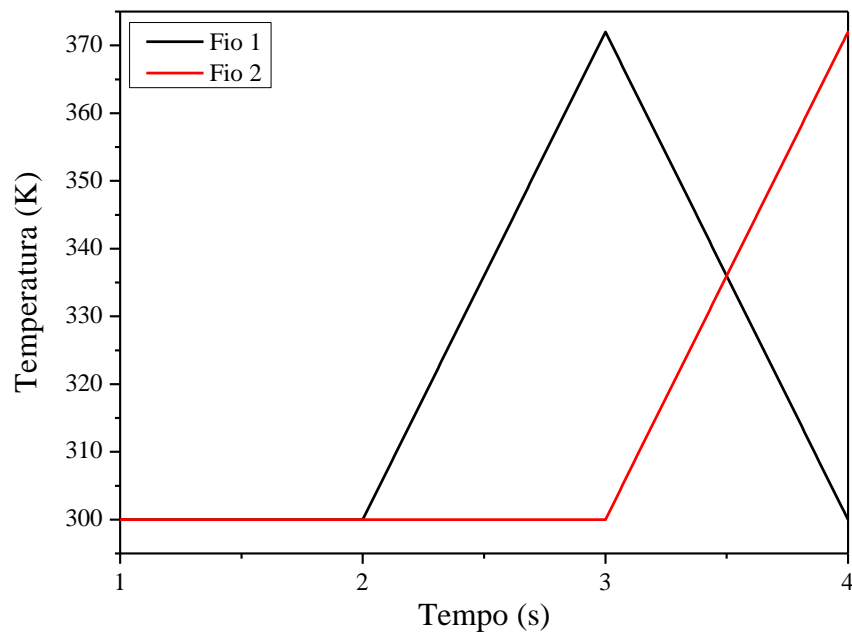


Figura 4.6 – Referência para o acionamento dos fios de liga NiTi do atuador.

O acionamento dos fios provoca um aumento na temperatura ativando o EMF da liga, fazendo com que os fios movimentem o elemento atuado (Figura 4.7). Na Figura 4.7 (a) observa-se o movimento gerado pelo acionamento do Fio 1 e na Figura 4.7 (b) observa-se o movimento gerado pelo acionamento do Fio 2.

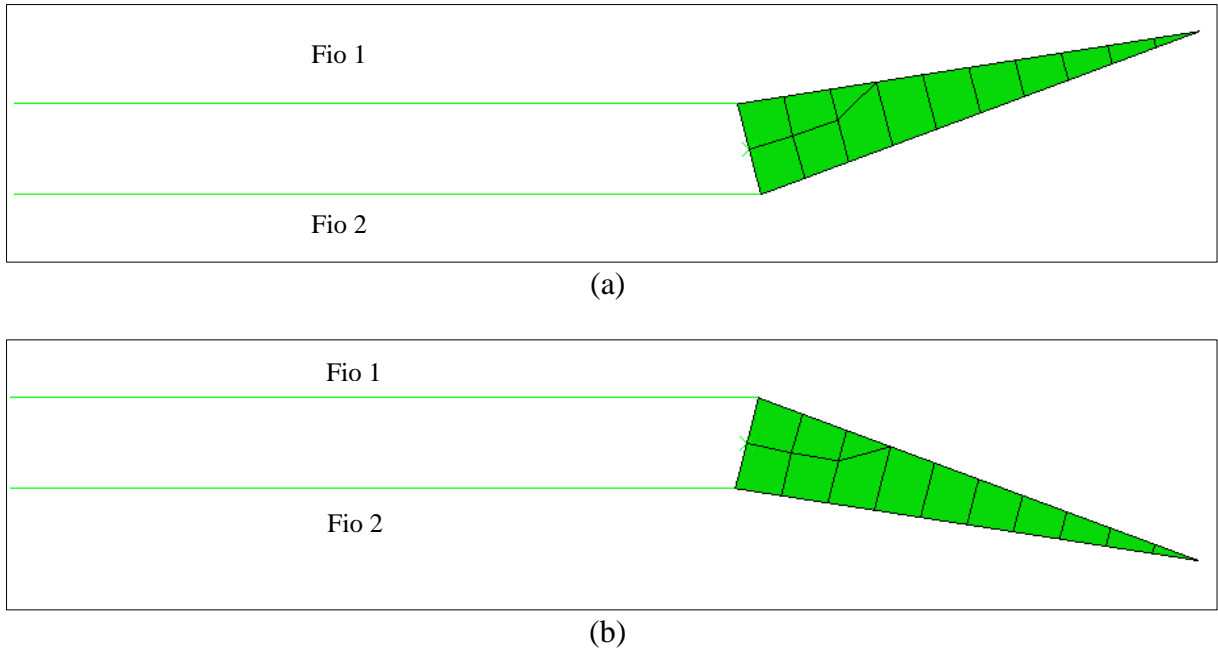


Figura 4.7 – Movimento do *flap* simulado. (a) Acionamento do Fio 1, (b) Acionamento do Fio 2.

Pelos resultados das simulações apresentadas, observa-se que o fio de liga NiTi é acionado após um curto período, elevando a sua temperatura, fazendo com que o fio adjacente seja deformado e mova o elemento atuado.

O movimento obtido pela análise foi avaliado pela quantidade de giro obtida na simulação. O gráfico mostrado na Figura 4.8 apresenta o ângulo de giro obtido com o acionamento dos fios. Observa-se que o giro com o acionamento de ambos os fios é de cerca de 0,31 rad (aproximadamente  $17,8^\circ$ ). Percebe-se, também, que com o acionamento do fio adjacente obtém-se um pequeno aumento do ângulo de giro, para cerca de 0,32 rad (aproximadamente  $18,3^\circ$ ), o que pode ser atribuído aos efeitos de expansão térmica dos fios, efeito este que pode ocorrer durante o aquecimento do fio até a temperatura crítica do material (FUNAKUBO E KENNEDY, 1987; OTSUKA E WAYMAN, 1998). Comparando-se os resultados obtidos pela simulação com o giro projetado de 0,35 rad ( $20^\circ$ ), observa-se que o resultado obtido é próximo ao desejado, com um erro de 8,5%.

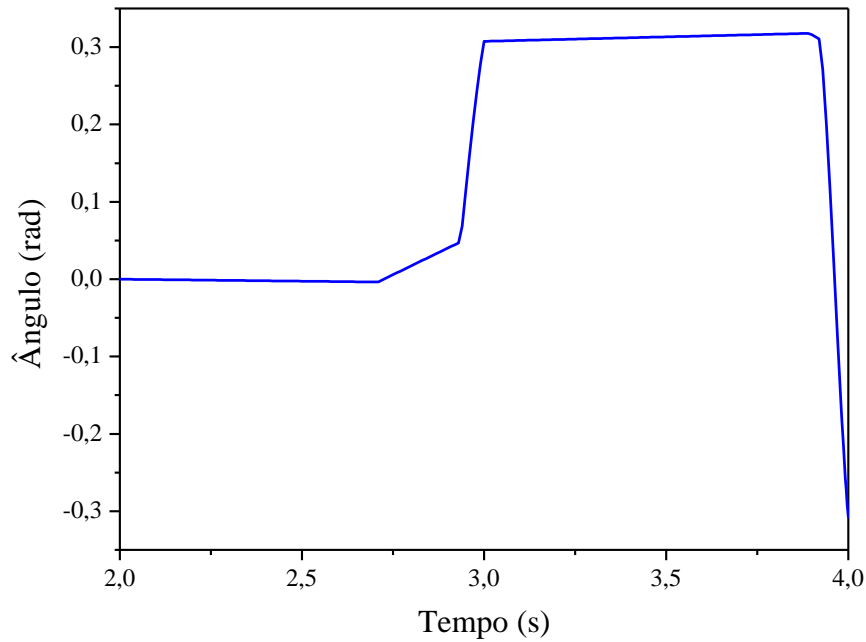


Figura 4.8 – Quantidade de giro gerada pelo atuador em função do período de atuação dos fios.

A diferença entre os valores de giro desejado com o obtido já era esperada devido à restrição da recuperação total da deformação do fio de liga NiTi imposta pela forma com que estes estão conectados (RAO, SRINIVASA E REDDY, 2015). A recuperação parcial dos fios de liga NiTi, melhor observada na Figura 4.9, gera como resposta a tensão de recuperação do material. A Figura 4.9 também mostra o processo de recuperação de deformação dos fios durante o seu acionamento.

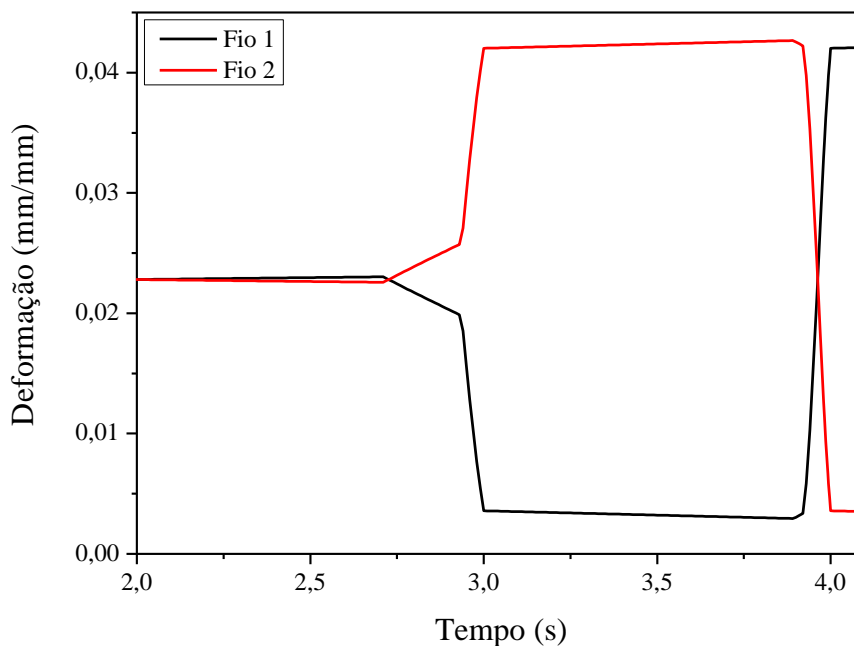


Figura 4.9 – Deformação dos fios de memória de forma resultante da análise numérica.

Pela Figura 4.9 observa-se que no período entre 2 e 3 segundos, período em que o Fio 1 é acionado (Figura 4.6), a deformação inicial ao qual este foi submetido é recuperada quase que totalmente. A pequena deformação residual confere ao material a capacidade de gerar grande tensão de recuperação, que pode ser observada na Figura 4.10. Quando o fio acionado atinge a temperatura crítica, este recupera sua forma (Figura 4.9) quase que instantaneamente. O fio acionado deforma o adjacente, já que estes são ligados de forma antagônica, sendo que a deformação causada é então equivalente à recuperada com sinal invertido.

No intervalo de tempo entre 3 e 4 segundos (Figura 4.9), observa-se um pequeno aumento na deformação do Fio 2, e conseqüentemente uma redução na deformação do Fio 1 (aumento negativo, sinal invertido), que pode ser atribuída à expansão térmica do material que é quase imperceptível. Quando o fio atinge a temperatura crítica, este recupera sua forma, tracionando o fio adjacente, causando deformação neste. A deformação residual observada no Fio 2 é igual à do Fio 1 com sinal invertido. O processo descrito acima é cíclico, variando de acordo com o fio que é acionado.

A deformação residual nos fios durante o seu acionamento é de aproximadamente 0,0036%, muito pequena comparada com a deformação recuperada pelo fio. A deformação máxima que

os fios atingem é de aproximadamente 4,50%, mostrando que o processo de atuação proposto para os fios de liga NiTi não causa deformação plástica ao material, já que a deformação máxima dos fios é menor que  $\varepsilon_L$ , mostrado na Tabela 4.2.

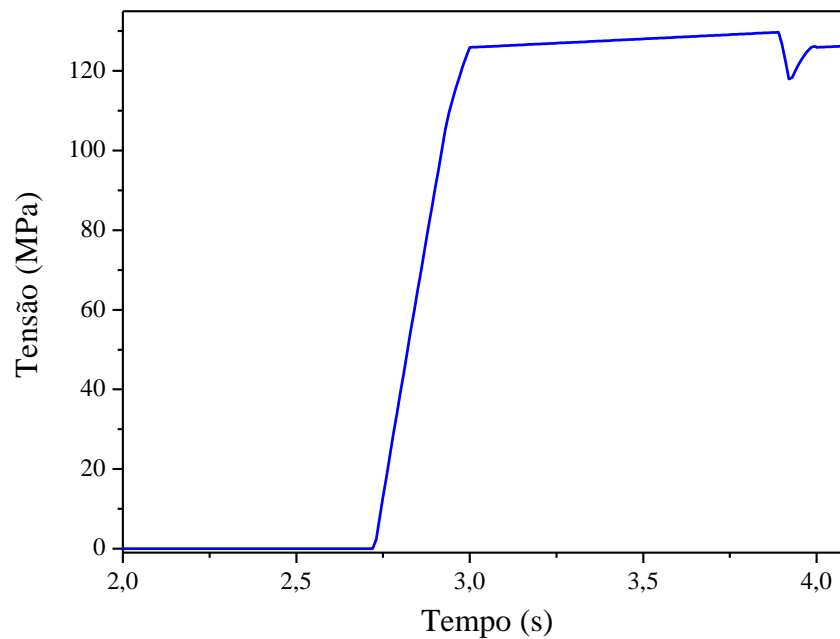


Figura 4.10 – Diagrama de tensão do sistema de atuação.

A Figura 4.10 demonstra como é a resposta de tensão dos fios de liga NiTi no decorrer da simulação do sistema de atuação. Observa-se que no início da simulação do sistema de atuação os fios estão livres de tensão, e que em um determinado momento a tensão no material começa a subir, chegando a 125,91 MPa na temperatura máxima, no tempo de 3 segundos (Figura 4.7). No próximo intervalo observa-se um pequeno aumento da tensão nos fios, chegando a aproximadamente 129,72 MPa, aumento este que pode ser atribuído à expansão térmica sofrida pelo fio. Em um determinado momento neste intervalo, a tensão no sistema é aliviada. O alívio de tensão pode ser atribuído à transformação de fase que ocorre no fio que está resfriando, chegando a 117,93 MPa. Quando o fio acionado atinge a temperatura crítica do material, a tensão no sistema volta a subir.

O processo de pré-deformação dos fios de liga NiTi é mostrado na Figura 4.11, onde os fios são carregados simultaneamente com força de 85 N, fazendo com que o material chegue à tensão de aproximadamente 108,22 MPa, para que cause deformação acima da desejada. No

processo de descarregamento, a deformação desejada é atingida pela recuperação elástica do material.

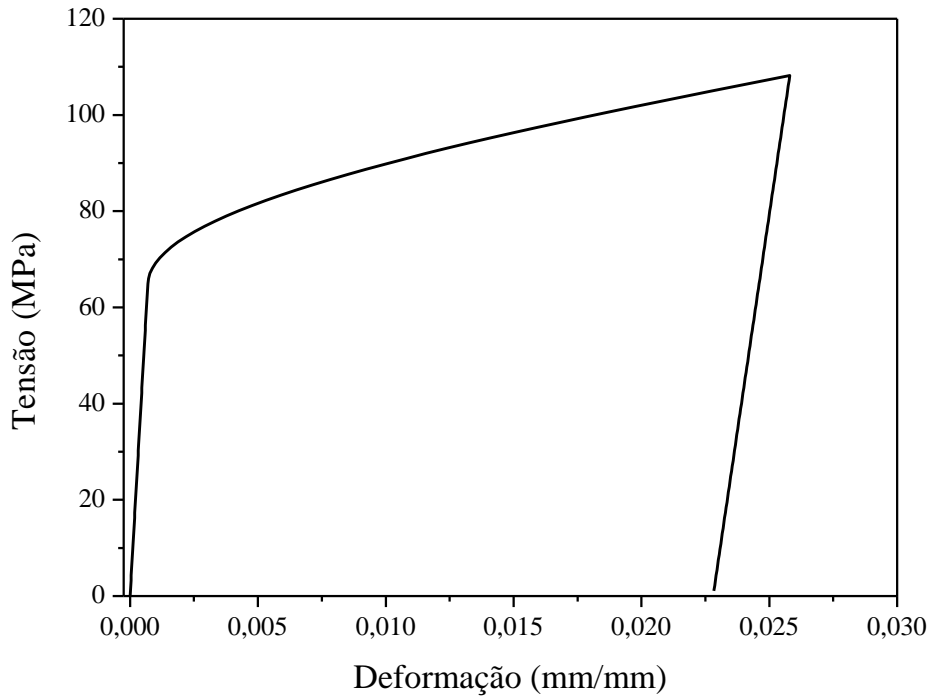
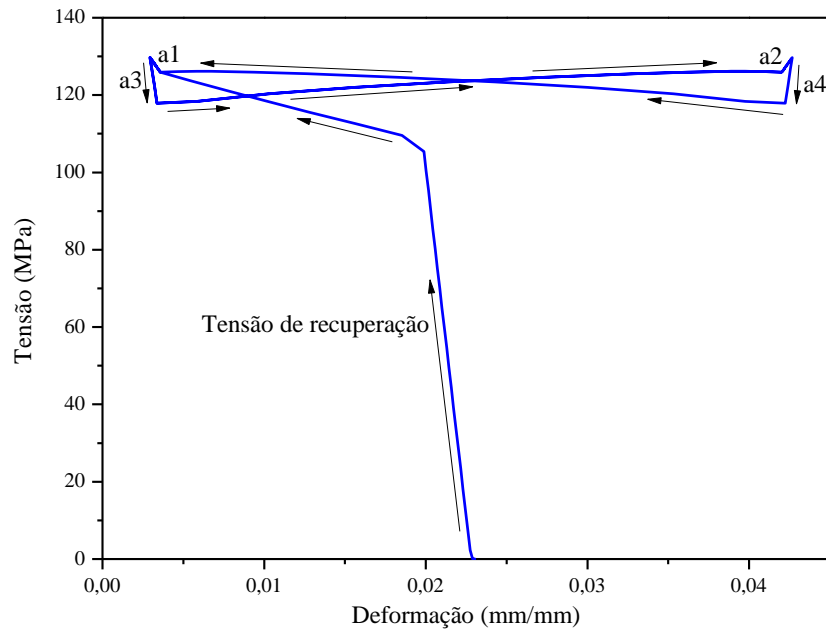


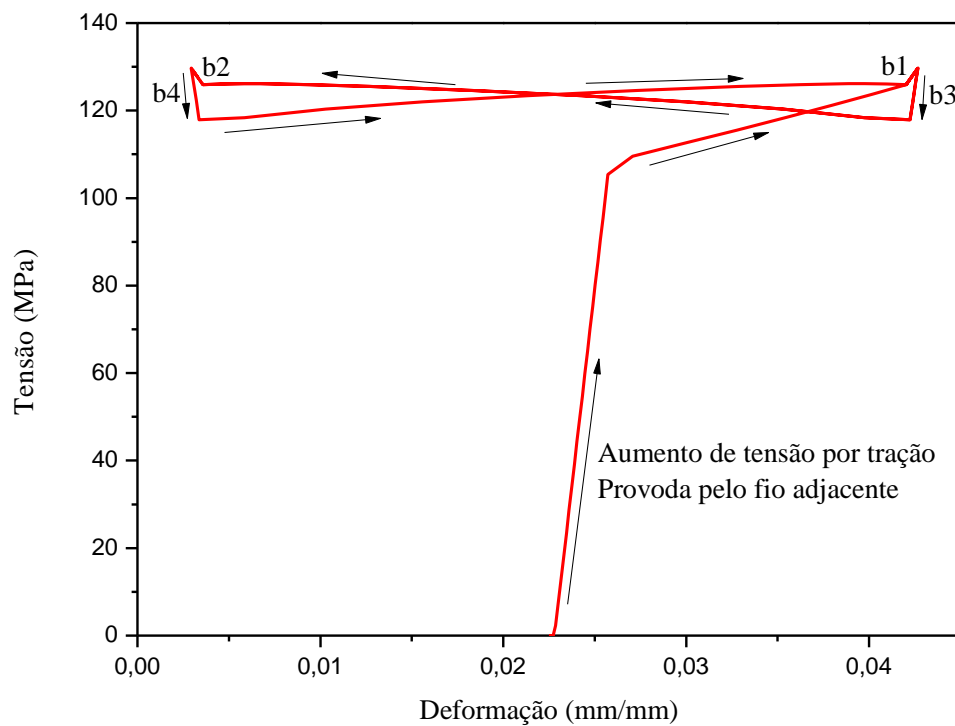
Figura 4.11 – Pré-deformação dos fios de liga NiTi.

A relação de tensão *versus* deformação do acionamento do sistema de atuação é mostrada na Figura 4.12. Comparando-se os gráficos da Figura 4.12 (a) com a Figura 4.12 (b) observa-se que estes são espelhados. Este comportamento já era esperado devido à forma com que os fios são conectados. Também se pode observar como o sistema de atuação age em relação aos fios de NiTi, mostrando a influência que um fio exerce sobre o seu adjacente.

Nas regiões indicadas pelas letras (a1), (a2), (b1) e (b2) na Figura 4.12, observa-se um pequeno aumento da tensão que pode ser atribuído ao comportamento térmico do material, mostrando a relação da deformação causada por este comportamento na contribuição da tensão no sistema, diferentemente do mostrado na Figura 4.10.



(a)



(b)

Figura 4.12 – Diagrama tensão *versus* deformação do sistema de atuação (a) para o Fio 1 e (b) para o Fio 2.

Outra informação que pode ser inferida a partir dos gráficos da Figura 4.12 é o pequeno alívio da tensão nos fios, representado pela região indicada pela letra (a3) e (b3). O alívio da tensão ocorre nos fios que estão no processo de resfriamento, onde a queda da tensão pode ser atribuída à transformação TM que ocorre no material (OTSUKA E REN, 2005). Conseqüentemente, o alívio de tensão provoca o alívio da tensão do fio adjacente que é representado no diagrama pela letra (a4) e (b4), isto se dá devido ao fato de os fios estarem conectados de forma antagônica.

As simulações do modelo preliminar mostram a possibilidade da aplicação do sistema de atuação proposto para mover os *flaps* de uma aeronave, já que o movimento obtido é condizente com o desejado para o sistema. Observa-se também que os fios de liga NiTi têm capacidade de gerar grande tensão para o sistema de forma rápida.

O tempo necessário para que o fio de liga NiTi aqueça até a temperatura de transformação é calculado pela Equação (3.15), com os resultados são apresentados na Tabela 4.5. Os parâmetros do material usados para calcular o tempo são definidos pela Tabela 4.4. A partir desses resultados observa-se que o sistema de aquecimento escolhido é muito eficiente, conseguindo atingir a temperatura desejada para o sistema de atuação em aproximadamente 2 segundos.

Tabela 4.4 - Parâmetros obtidos na literatura para o cálculo do tempo.

Propriedade	Magnitude
$\rho_A$	$11,0 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$
$\rho_M$	$7,0 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$
c	329,0 J/kg K
h	10 a 150 J/s m <sup>2</sup> K

Fonte: UCHIL et al. (1999); VAN WYLEN, SONNTANG E BORGNACKKE (2007).

Com a Equação (3.18) pode-se calcular o tempo que o fio de liga NiTi leva para resfriar da temperatura de transformação da liga até a temperatura ambiente. Na Tabela 4.5 pode-se perceber que o tempo necessário para que a liga resfrie é relativamente elevado, chegando a aproximadamente 53 segundos, dificultando o uso em aplicações que requerem maior

velocidade de atuação e confirmando uma desvantagem deste material. Esta desvantagem pode ser minimizada utilizando formas de aumentar a velocidade de resfriamento do sistema. Para a aplicação proposta uma opção seria a utilização de entradas de ar para forçar o resfriamento, aumentando desta forma o valor de  $h$  na Equação (3.18) e reduzindo o tempo de resfriamento.

Tabela 4.5 – Tempo de aquecimento e de resfriamento da liga NiTi.

Tensão elétrica considerada	Tempo de Aquecimento	Tempo de resfriamento	Tempo de resfriamento forçado
12,0 V	1,83 s	53,05 s	3,54 s

#### 4.4 Modelo Baseado no Perfil da Asa de Um Aeromodelo

Os resultados obtidos pela simulação do modelo baseado na asa de aeromodelo são apresentados a seguir. A quantidade de giro obtida na simulação do modelo é apresentada na Figura 4.13, onde relaciona-se a deformação inicial dada aos fios de liga NiTi com a quantidade de giro obtida. Pode-se observar que a quantidade de giro obtida pelo atuador aumenta com a deformação inicial do fio, como esperado. Isto demonstra que a deformação inicial dada ao fio de liga NiTi é um dos parâmetros de maior importância para o projeto do atuador, em que o movimento gerado é diretamente influenciado por ela.

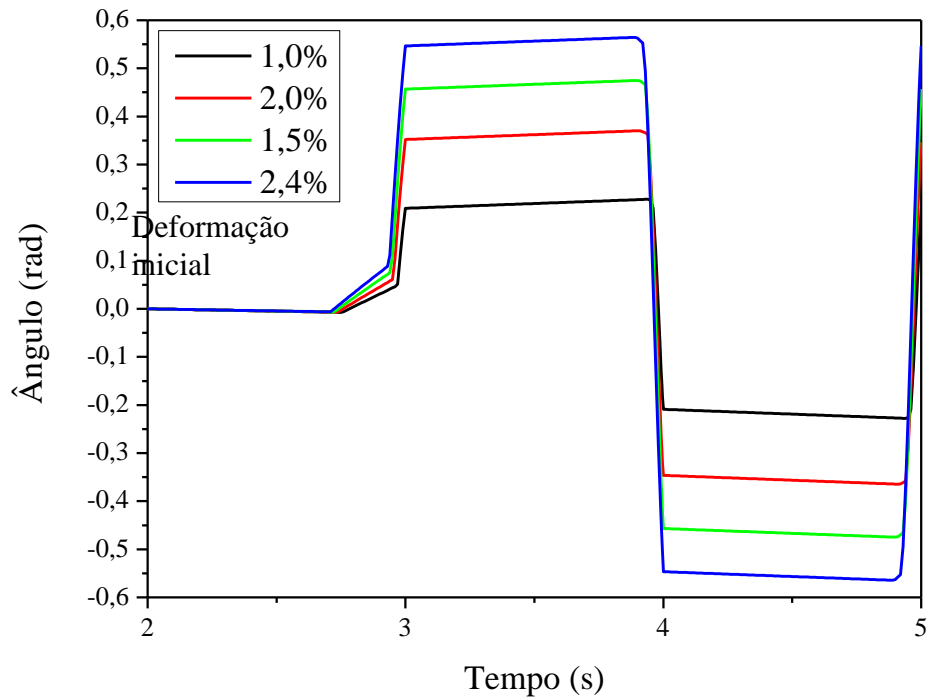


Figura 4.13 – Relação do giro obtido com a deformação inicial dada aos fios.

A quantidade de giro obtida pelo elemento atuado no processo de acionamento dos fios pode ser determinada pelas Equações (3.4) e (3.6), mostradas na seção anterior. Os valores dos ângulos de giro obtidos pelos cálculos e pela simulação são mostrados na Tabela 4.6. Percebe-se uma pequena diferença entre os resultados obtidos pela Equação (3.4) e pela Equação (3.6). Esta diferença pode ser atribuída à aproximação geométrica usada para descrever o ângulo de giro, como mostrado nas Figura 3.2 e Figura 3.3. A diferença entre estes resultados aumenta com o aumento da deformação inicial dada aos fios, o que pode ser atribuído à forma com que o movimento do atuador é aproximado no desenvolvimento das equações.

Tabela 4.6 – Comparação do giro do elemento atuado calculado com o giro obtido na simulação.

Deformação Inicial	Equação (3.4)	Equação (3.6)	Obtido na simulação
0,010	0,27 rad	0,27 rad	0,21 rad
0,015	0,41 rad	0,42 rad	0,35 rad
0,020	0,54 rad	0,57 rad	0,46 rad
0,024	0,65 rad	0,70 rad	0,55 rad

Pela Tabela 4.6 percebe-se uma discrepância nos resultados obtidos na simulação do modelo com os resultados calculados pelas Equações (3.4) e (3.6). Esta diferença pode ser atribuída à não recuperação total da deformação do fio de liga NiTi (RAO, SRINIVASA E REDDY, 2015), que pode ser mais evidenciada na Figura 4.14, que representa a deformação residual nos fios. A deformação residual comprova que a diferença entre o giro calculado e o giro obtido pela simulação é condizente, ou seja, quanto maior a deformação residual maior é a diferença do giro obtido e do calculado.

As Figura 4.14 e Figura 4.15 apresentam como os fios de liga NiTi se deformam no acionamento do sistema de atuação, evidenciando-se de forma mais clara como o sistema de atuação proposto funciona. Por estas figuras também se pode perceber que a deformação inicial dada aos fios não causa deformação permanente no sistema, em que o valor da deformação máxima obtida no sistema de atuação é mostrado na Tabela 4.7.

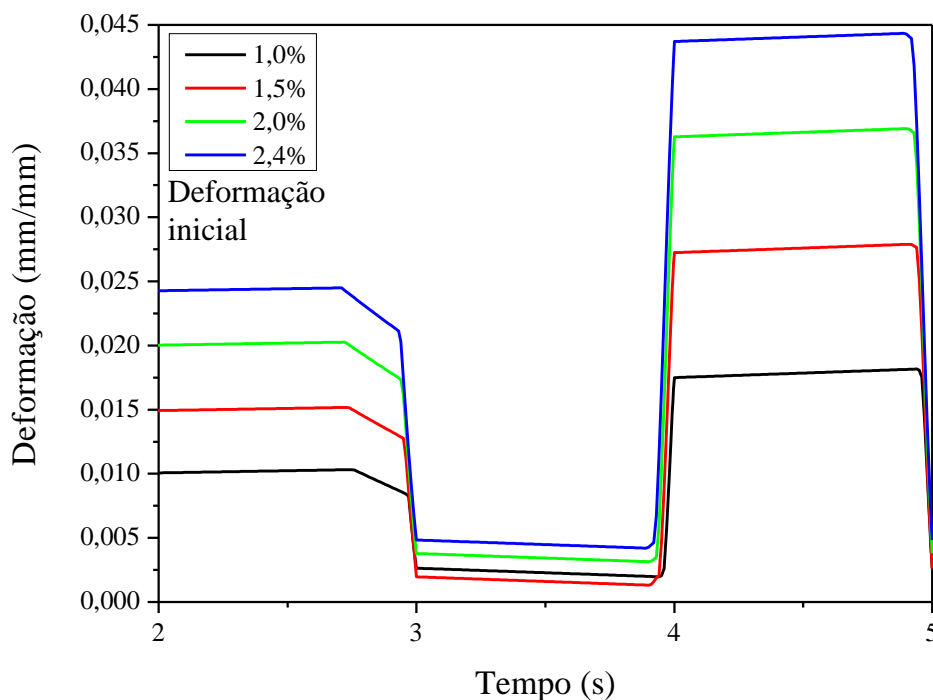


Figura 4.14 – Relação da deformação recuperada pelo Fio 1 com a deformação inicial.

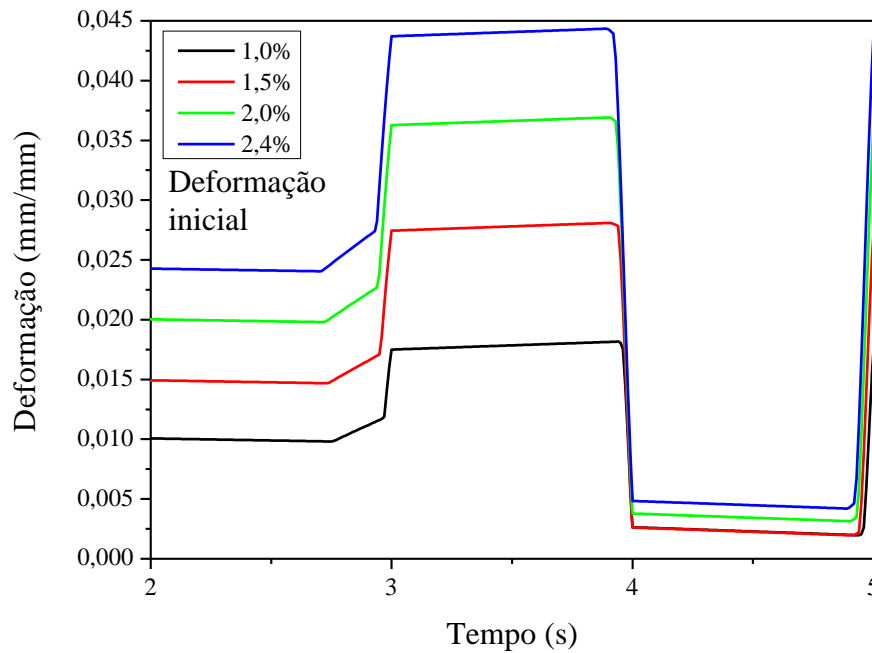


Figura 4.15 – Relação da deformação recuperada pelo Fio 2 com a deformação inicial.

Tabela 4.7 – Recuperação da deformação e deformação residual dos fios atuadores.

Deformação Inicial	Máxima Deformação do sistema	Deformação Residual
0,010	0,018	0,002
0,015	0,028	0,003
0,020	0,036	0,004
0,024	0,044	0,005

A Tabela 4.7 também apresenta a quantidade de deformação residual nos fios de liga NiTi para cada deformação inicial avaliada. Com estas deformações pôde-se calcular a quantidade de giro que **esta poderia fornecer para o sistema**, mostrados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Ângulo de giro calculado com a deformação residual nos fios de liga NiTi.

Deformação Inicial	Giro calculado Eq,(3.4)	Giro calculado Eq,(3.6)	Soma do giro calculado com o giro obtido
0,010	0,027 rad	0,027 rad	0,251 rad
0,015	0,041 rad	0,041 rad	0,377 rad
0,020	0,054 rad	0,054 rad	0,514 rad
0,024	0,068 rad	0,068 rad	0,618 rad

Percebe-se pelos resultados obtidos que o giro calculado pelas Equações (3.4) e (3.6) são coincidentes, o que pode ser atribuído à pequena deformação residual nos fios. Somando o giro calculado com a deformação residual e com o ângulo de giro obtido na simulação, também mostrado na Tabela 4.8, e comparando-se essa soma com os resultados mostrados pela Tabela 4.6, observa-se que o resultado obtido é bem próximo do giro previsto pela Equação (3.4), considerando a recuperação total da deformação dos fios. Isso indica que o fio de liga NiTi deve ter sua recuperação de forma restringida para que este possa gerar uma grande tensão de recuperação para o sistema de atuação. Também pode-se perceber que, para uma pequena deformação não recuperada pelos fios, pode-se gerar uma tensão elevada. A tensão obtida pelo sistema de atuação é mostrada na Figura 4.16, onde percebe-se como a deformação inicial dada aos fios de liga NiTi influencia na tensão gerada pelo sistema para o mesmo comprimento indeformado.

A tensão gerada pelo sistema para cada deformação inicial do fio de liga NiTi são descritas na Tabela 4.9. Com estes resultados, pôde-se determinar as forças geradas pelos fios durante o acionamento do sistema de atuação, também mostradas nesta tabela. Esta também quantifica a queda de tensão atribuída à transformação de fase da liga para cada deformação inicial.

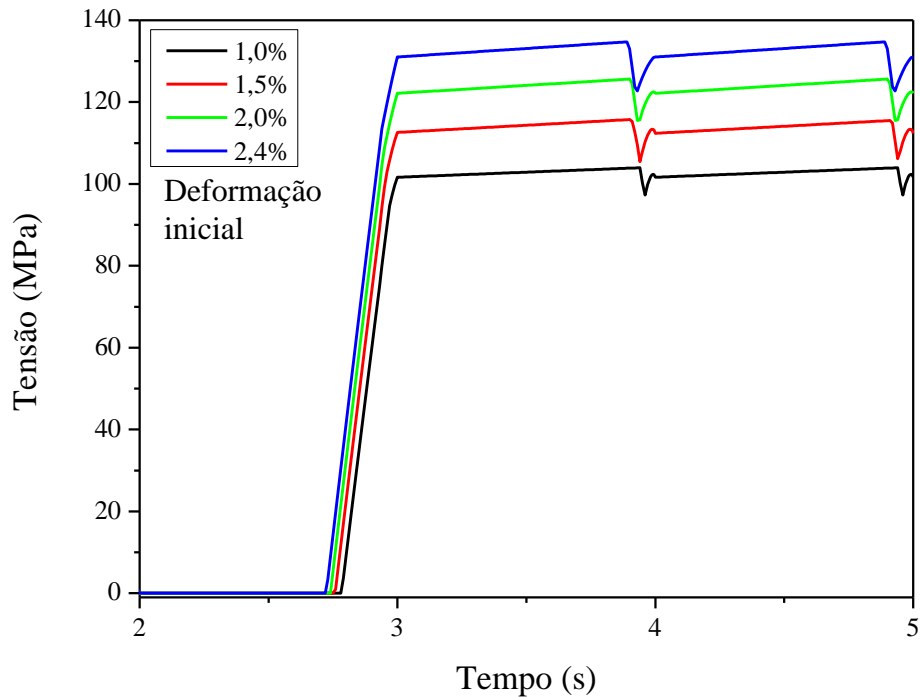


Figura 4.16 – Comportamento da tensão no sistema de atuação para as deformações iniciais avaliadas.

Tabela 4.9 – Tabela que descreve a tensão de recuperação, força gerada pelo sistema e a queda de tensão.

Deformação Inicial	Tensão de recuperação (MPa)	Força gerada pelo sistema (N)	Queda de tensão no sistema (MPa)
0,010	101,64	79,83	4,36
0,015	112,60	88,44	7,12
0,020	122,15	95,94	6,65
0,024	131,02	102,90	8,28

Com os dados obtidos na simulação do modelo baseado na seção da asa do aeromodelo, pôde-se inferir que o comprimento indeformado dos fios de liga NiTi, bem como a deformação inicial dos mesmos e os parâmetros geométricos do sistema são de grande importância para o projeto do atuador feitos de liga NiTi, pois estes influenciam diretamente na tensão e força geradas pelo sistema e no movimento que este desenvolve no acionamento dos fios.

# 5

## CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

Concluiu-se que o estudo por elementos finitos realizado no sistema de atuação utilizando ligas NiTi foi bem sucedido, pois com as análises obtidas por este estudo pôde-se definir parâmetros de força e quantidade de movimento que este material pode alcançar para diferentes aplicações.

A caracterização térmica é importante para definir as temperaturas de transformações de fase além dos eventos térmicos que ocorrem no material, através da análise de DSC. Pela caracterização mecânica pôde-se obter os módulos de elasticidade do material, a máxima deformação recuperável da liga, dentre outros parâmetros do material. Os parâmetros obtidos nestas caracterizações são essenciais para a análise de elementos finitos, onde necessita-se de uma sub-rotina UMAT para realização destas.

A sub-rotina UMAT é usada nas análises de elementos finitos em que o comportamento constitutivo do material usado não é linear e se mostrou útil para tal. Para confirmar o desempenho da sub-rotina se fez necessário a validação desta, onde pôde-se constatar que a resposta obtida por esta se aproxima muito da resposta experimental obtida pelo ensaio de tração da liga para todos os modelos constitutivos descritos pela sub-rotina. A validação também foi necessária para definir qual modelo constitutivo descrito pela sub-rotina é o mais apropriado para ser usada nas análises do atuador proposto, na qual o modelo de LIANG E RORGERS (1990) apresentou melhores resultados, não observando-se nenhum problema de convergência durante as análises efetuadas.

Os resultados das análises referentes ao modelo preliminar do atuador proposto nos mostram que o movimento obtido durante a simulação do sistema de atuação é muito próximo do desejado para este projeto. Além de a tensão gerada pelo sistema de atuação ser relativamente grande quanto comparada com a geometria do sistema de atuação, ou seja, para um fio de NiTi que possui um diâmetro muito pequeno pode-se obter uma grande resposta de tensão.

Percebeu-se também que parte da deformação inicial dada aos fios não é recuperada, este fato pode ser atribuído à tensão de recuperação gerada pelos fios, onde esta só é desenvolvida pelos fios quando a recuperação da sua forma é restringida. Para o sistema de atuação proposto a recuperação da deformação dos fios é restringida pela forma em que os fios de liga NiTi estão conectados.

No modelo baseado na asa de um aeromodelo observou-se como a deformação inicial dos fios de liga NiTi pode influenciar na resposta obtida pelo atuador. Como mostrado, quanto maior a deformação inicial dos fios, maior a quantidade de giro obtida na simulação. Também observou-se que a tensão de recuperação obtida pelo sistema de atuação aumenta da mesma forma que o giro. A desvantagem observada é o aumento da deformação residual no sistema, que causa uma maior perda na quantidade de giro obtida pelo sistema, mas, em consequência, esta também representa uma maior tensão de recuperação obtida pelo sistema.

Pelas simulações realizadas pôde-se perceber que este material possui grande potencial para ser usado como atuador para alguns sistemas. A principal vantagem observada para este material é a capacidade de gerar grande força de atuação quando este é aquecido, mesmo utilizando-se um fio de pequenas dimensões. Observa-se também que as características do material, bem como as características geométricas da liga NiTi influenciam diretamente as respostas obtidas. Com relação ao sistema de atuação proposto, para mover uma das superfícies de controle de uma aeronave, o material se mostra eficaz para este propósito, conseguindo mover de forma satisfatória a superfície, gerando força suficiente para vencer as forças aerodinâmicas que atuam na asa.

## **5.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros**

Desenvolver um protótipo do atuador de fios de liga NiTi para realizar testes de bancada, avaliando-se a quantidade de giro obtida para o sistema proposto e o tempo de resposta para o

mesmo. Comparar os resultados obtidos com os resultados teóricos obtidos nas simulações e nos cálculos.

Desenvolver outras sub-rotina UMAT para outros modelos constitutivos desenvolvidos para as LMF, com a capacidade de descrever melhor as transformações que ocorrem na liga.

Avaliar a resposta da sub-rotina SMA\_UM para as LMF que apresentam a superelasticidade, verificando a possibilidade da sua utilização na simulação de outros sistemas, por exemplo, sistemas odontológicos. (FUNAKUBO E KENNEDY, 1987)

# 6

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, A. S. De. *Controle de vibração de um sistema sob desbalanceamento rotativo utilizando atuador de liga com memória de forma*. 2011. 135f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB.

AURICCHIO, F.; PETRINI, L. A three-dimensional model describing stress-temperature induced solid phase transformations: Solution algorithm and boundary value problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004. n. 6, v. 61, p. 807–836.

BANDEIRA, E. L.; SAVI, M. A.; MONTEIRO, P. C. C.; NETTO, T. A. Finite element analysis of shape memory alloy adaptive trusses with geometrical nonlinearities. *Archive of Applied Mechanics*, 2006. n. 3-4, v. 76. p. 133–144.

BARBARINO, S.; FLORES, E. I. S.; AJAJ, R. M. et al. A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft. *Smart Materials and Structures*, 2014. n. 6, v. 23. p. 063001.

BORN, R. M. *Aplicação de Ligas com Memória de Forma Magnéticas em Atuadores Lineares*, 2007. 91f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BOYD, J. G.; LAGOUDAS, D. C. A thermodynamical constitutive model for shape memory materials. Part I. The monolithic shape memory alloy. *International Journal of Plasticity*, 1996a. n. 6, v. 12. p. 805–842.

BOYD, J. G.; LAGOUDAS, D. C. A thermodynamical constitutive model for shape memory materials. Part II. The SMA composite material. *International Journal of Plasticity*, 1996b. n. 7, v. 12. p. 843–873.

BRINSON, L. C. 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*, Abril de 1993. n. 2, v. 4. p. 229–242.

CALKINS, F. T.; MABE, J. H. Shape Memory Alloy Based Morphing Aerostructures. *Journal of Mechanical Design*, Nov. de 2010. n. 11, v. 132. p. 111012.

CHOPRA, I. Review of State of Art of Smart Structures and Integrated Systems. *AIAA Journal*, Nov. de 2002. n. 11, v. 40. p. 2145–2187.

CLAEYSSSEN, F.; JÄNKER, P.; LELETTY, R. et al. New Actuators for Aircraft , Space and Military Applications. *In: 12th International Conference on New Actuators. ACTUATOR 2010*. Bremen, Jun. de 2010. p. 324–330.

EPPE, J. J.; CHOPRA, I. In-flight tracking of helicopter rotor blades using shape memory alloy actuators. *Smart Materials and Structures*, 2001. n. 1, v. 10. p. 104-111.

FUNAKUBO, H.; KENNEDY, J. B. (Ed.). *Shape Memory Alloys*. Tokyo: Gordon and Breach Science Publishers, 1987. v. 1. (Precision Machinery and Robotics).

GARNER, L. J.; WILSON, L. N.; LAGOUDAS, D. C.; REDINIOTIS, O. K. Development of a shape memory alloy actuated biomimetic vehicle. *Smart Materials and Structures*, 2000. n. 5, v. 9. p. 673–683.

GUGLIERI, G.; SARTORI, D. Experimental Characterization of Actuators for Micro Air Vehicles. *International Journal of Micro Air Vehicles*, Jun. 2011. n. 2, v. 3. p. 49–69.

HARTL, D. J.; LAGOUDAS, D. C.; CALKINS, F. T.; MABE, J. H. Use of a Ni60Ti shape memory alloy for active jet engine chevron application: I. Thermomechanical characterization. *Smart Materials and Structures*, jan. 2010. n. 1, v. 19. p. 015020.

HIBBITT, KARLSON & SORENSEN Inc. ABAQUS/Standard User's Manual, version 6.10.1. Pawtucket (RI): Hibbitt, Karlsson & Sorensen, 2010.

HIBBITT, KARLSON & SORENSEN Inc. ABAQUS user subroutines reference manual. *HKS INC*, 2005.

HUANG, W. *Shape Memory Alloys and their Application to Actuators for Deployable*

*Structures*, Mar 1998. 192f. Tese (Doutorado em Engenharia) – University of Cambridge, Peterhouse.

HUANG, W. On the selection of shape memory alloys for actuators. *Materials & Design*, 2002. n. 1, v. 23. p. 11–19.

JANOCHA, H. (Ed.). *Actuators: Basic and Application*. Springer Science & Business Media, 2004.

JARDINE, A. P.; KUDVA, J. N.; MARTIN, C. A.; APPA, K. Shape memory alloy TiNi actuators for twist control of smart wing designs. In: 1996 Symposium on Smart Structures and Materials. *International Society for Optics and Photonics*. San Diego, CA, Mai. 1996. p. 160-165.

JELALI, M.; SCHWARZ, H. Nonlinear identification of hydraulic servo-drive systems. *IEEE Control Systems Magazine*, Out. 1995. n. 5, v. 15. p. 17–22.

LAGOUDAS, D.; BO, Z.; QIDWAI, M. A unified thermodynamic constitutive model for SMA and finite element analysis of active metal matrix composites. *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 1996. n. 2, v. 3. p. 153–179.

LAGOUDAS, D.; BO, Z.; QIDWAI, M. A.; ENTCHEV, P. B. SMA\_UM: User Material Subroutine for Thermomechanical Constitutive Model of Shape Memory Alloy. *Texas A&M University College Station TX*, 2003.

LAGOUDAS, D. (Ed.); QIDWAI, M. A.; ENTCHEV, P. B. et al. *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications*. Boston, MA: Springer US, 2008. v. 1

LIANG, C.; DAVIDSON, F. M., SCHETKY, L. M.; STRAUB, F. K. Applications of Torsional Shape Memory Alloy Actuators for Active Rotor Blade Control - Opportunities and Limitations. In: 1996 Symposium on Smart Structures and Materials. *International Society for Optics and Photonics*, 1996. p. 91-100.

LIANG, C.; ROGERS, C. A. One-Dimensional Thermomechanical Constitutive Relations for Shape Memory Materials, Abr 1990. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 8, p. 285–302.

LIMA, L. C. J. *Otimização do Arqueamento de um Aerofólio Utilizando Ligas com Memória de Forma*, Abr. 2013. 66f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade

Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

LIU, Y.; XIE, Z.; VAN HUMBEECK, J; DELAEY, L. Deformation of shape memory alloys associated with twinned domain re-configurations. *Materials Science and Engineering: A*, Dez. 1999. v. 273-275. p. 679–684.

MADDEN, J. D. W.; SCHMID, B.; HECHINGER, M. et al. Application of polypyrrole actuators: Feasibility of variable camber foils. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004. n. 3, v. 29. p. 738–749.

MAESTA, M. F. *Controle Nebuloso Aplicado em Asas Adaptativas Utilizando Ligas de Memória de Forma*, Ago. 2012. Dissertação (Po´s-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP.

MAVROIDIS, C.; PFEIFFER, C.; MOSLEY, M. Conventional Actuators , Shape Memory Alloys , and Electrorheological Fluids. In: BAR-COHEN, Y. (Ed.). *Automation, Miniature Robotics and Sensors for Non-Destructive Testing and Evaluation*. Abr 1999. cap. 5. p. 1–26.

OTSUKA, K.; REN, X. Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys. *Progress in Materials Science*, 2005. n. 5, v. 50. p. 511–678.

OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. *Shape Memory Materials*. 1998. Cambridge university press. p. 284.

PAIVA, A.; SAVI, M. A.; BRAGA, A. M. B.; PACHECO, P. M. C. L. A constitutive model for shape memory alloys considering tensile-compressive asymmetry and plasticity. *International Journal of Solids and Structures*, 2005. v. 42. p. 3439–3457.

QIDWAI, M. A.; LAGOUDAS, D. C. On thermomechanics and transformation surfaces of polycrystalline NiTi shape memory alloy material. *International Journal of Plasticity*, 2000. n. 10-11, v. 16. p. 1309-1343.

RAHMAT, M. F.; SUNAR, N. H.; SALIM, S. N. S. et al. Review on Modeling and Controller Design In Pneumatic Actuator Control System. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Dez. 2011. n. 4, v. 4. p. 630–661.

RAO, A.; SRINIVASA, A. R.; REDDY, J. N. *Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators*. Springer, 2015.

RICHER, E.; HURMUZULU, Y. A High Performance Pneumatic Force Actuator System Part 1 - Nonlinear Mathematical Model. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Fev. 2001. n. 3, v. 122. p. 416–425.

ROGLIN, R.; HANAGUD, S. A helicopter with adaptive rotor blades for collective control. *Smart materials and structures*, 1996. n. 1, v. 5. p. 76–88.

SANTOS, L. DE A. *Aplicação de Método dos Elementos Finitos na Análise do Comportamento Mecânico de Instrumentos endodônticos de Níquel-titânio*, Abr. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.

SCHLÜTER, K.; HOLZ, B.; RAATZ, A. Principle Design of Actuators Driven by Magnetic Shape Memory Alloys. *Advanced Engineering Materials*, Ago. 2012. n. 8, v. 14. p. 682–686.

SENTHILKUMAR, M. Analysis of Sma Actuated Plain Flap Wing. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2012. n. 1, v. 5. p. 39–43.

SENTHILKUMAR, P.; JAYASANKAR, S.; SATEESH, V. L. et al. Development and wind tunnel evaluation of a shape memory alloy based trim tab actuator for a civil aircraft. *Smart Materials and Structures*, Set. 2013. n. 9, v. 22. p. 095025.

SOFLA, A. Y. N.; MEGUID, S. A.; TAN, K. T.; YEO, W. K. Shape morphing of aircraft wing: Status and challenges. *Materials & Design*, Mar. 2010. n. 3, v. 31. p. 1284–1292.

TANAKA, K. A thermomechanical sketch of shape memory effect: one-dimensional tensile behavior. *Res Mechanica*, 1986. p. 251–263.

UCHIL, J.; MOHANCHANDRA, K. P.; KUMARA, K. G. et al. Thermal expansion in various phases of Nitinol using TMA. *Physica B: Condensed Matter*, 1999. n. 3-4, v. 270. p. 289–297.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTANG, R. E.; BORGNAKKE, C. *Fundamentos de termodinâmica*. 7ª Edição. Editora Blucher, 2007.( Série Van Wylen)

WADLEY, H. N. G. Characteristics and Processing of Smart Materials. In: Virginia Univ, Smart Structures and Materials. *Implications for Military Aircraft of New Generation*. 1996. p(SEE N 97-11475 01-23).