



**CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA DE  
COMPÓSITOS HÍBRIDOS COM  
MEMÓRIA DE FORMA**

**Weimar Silva Castilho**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CARACTERIZAÇÃO TERMOMECAÂNICA DE**  
**COMPÓSITOS HÍBRIDOS COM MEMÓRIA DE FORMA**

**WEIMAR SILVA CASTILHO**

**ORIENTADOR: EDSON PAULO DA SILVA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS**

**PUBLICAÇÃO: ENM – DM – nº 19**  
**BRASÍLIA/DF: JULHO DE 2008**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CARATERIZAÇÃO TERMOMECAÂNICA DE COMPÓSITOS  
HÍBRIDOS COM MEMÓRIA DE FORMA**

**WEIMAR SILVA CASTILHO**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM SISTEMAS MECATRÔNICOS.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. EDSON PAULO DA SILVA, Dr., ENM - UnB  
(Orientador)**

---

**Prof. FLAMINIO LEVY NETO, PhD, ENM - UnB  
(Examinador Interno)**

---

**Prof. CARLOS JOSÉ DE ARAUJO, Dr., UFCG  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 04 DE JULHO DE 2008.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

CASTILHO, WEIMAR SIVA

Caracterização Termomecânica de Compósitos Híbridos com Memória de Forma xvii, 100 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2008).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

- |                               |                          |
|-------------------------------|--------------------------|
| 1. Confeção de moldes         | 2. Confeção de CPs SMAHC |
| 3. Ligas com Memória de Forma | 4. Materiais Funcionais  |
| 5. Estruturas adaptativas     | 6. Materiais compósitos  |
| I. ENM/FT/UnB                 | II. Título (série)       |

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

CASTILHO, W. S. de. (2008), Caracterização Termomecânica de Compósito Híbridos com Memória de Forma Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM – DM – nº 19 Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 100p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Weimar Silva Castilho.

TÍTULO: Caracterização Termomecânica de Compostos Híbridos com Memória de Forma

GRAU: Mestre em Sistemas Mecatrônicos                      Ano: 2008

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Weimar Silva Castilho  
Universidade de Brasília UNB – Departamento de Engenharia mecânica  
Campus Universitário Darcy Ribeiro – Asa Norte, Brasília – DF – Brasil, CEP: 70190-900.

## AGRADECIMENTOS

- Vários fatores são primordiais para o sucesso de um trabalho experimental. Em primeiro lugar a contribuição da causa primária de todas as coisas e inteligência suprema.
- O meu principal agradecimento vai para os meus primeiros mestres, professores amigos e amados Pais Aparecida de Deus Castilho e João Francisco de Castilho que sem dúvida nunca pouparam quaisquer esforços para que eu pudesse trilhar meu caminho, sempre me apoiaram e incentivaram aos estudos.
- A uma mãezinha que sempre sinto sua presença e vibrações de alegria, principalmente agora na conclusão de mais uma etapa de minha vida, mãe Maria Reinildes da Silva Castilho.
- Aquela que sempre com sua compreensão, incentivo, amor, carinho, estímulo e paciência, foi fundamental para o cumprimento desta jornada. Ela esteve ao meu lado durante todo o tempo me apoiando. A minha amada esposa Juliana Castilho: eterna amiga e companheira, parte deste trabalho é dela, que passou comigo por todo o processo do início, meio e fim.
- A minha linda e amada filha Maria Lúcia, pelo seu sorriso inspirador e motivador, cujo nascimento marcou esse processo.
- Ao professor Dr. Edson Paulo da Silva, pela grande contribuição, compreensão e dedicação para a realização deste trabalho.
- Ao amigo, companheiro e irmão Vailton Aves de Faria e sua família, companheiros que sempre me apoiaram e contribuíram para a realização deste trabalho.
- Àqueles que muito me ajudaram os amigos Eduardo Alberi e Bruno Alves, que muito contribuíram, para a conclusão deste trabalho.

- Aos professores, funcionários e colegas do mestrado em Sistemas Mecatrônicos da UNB, pelo apoio e amizade durante todo curso.
- À CAPES pelo suporte financeiro.
- À ELETRONORTE pelo suporte financeiro no contexto do projeto de pesquisa “Aplicações de Ligas com Memória de Forma para controle de vibração em máquinas e estruturas” Contrato N° 4500058354.

*Dedico este trabalho a uma flor cujo brilho  
de sua luz ilumina a minha vida, Maria Lúcia.*

## RESUMO

As ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys* – SMA) são materiais capazes de recuperar uma forma geométrica previamente estabelecida através do aquecimento. Esta singular propriedade das SMA possibilita o seu emprego em diversas situações que vão desde arcos ortodônticos e instrumentos cirúrgicos a estruturas adaptativas para controle de forma e de vibração. Devido à complexidade do seu comportamento termomecânico a sua caracterização termomecânica é um passo fundamental no desenvolvimento de aplicações baseadas em SMA. No desenvolvimento de estruturas adaptativas para controle de forma e de vibração, os compósitos híbridos com memória de forma – *Shape Memory Alloy Hybrid Composites* (SMAHC) – são a forma mais promissora de emprego destas ligas. Entretanto, além da complexidade associada ao comportamento das SMA, os materiais SMAHC envolvem ainda a complexidade dos compósitos, tornando a caracterização termodinâmica de materiais SMAHC ainda mais necessária. O objetivo do presente trabalho é caracterizar termomecanicamente materiais SMAHC. Tal caracterização consiste, basicamente, do levantamento de curvas tensão-deformação para diferentes combinações matriz/fios de SMA a diferentes temperaturas (nas fases martensítica e austenítica). Uma análise comparativa entre os resultados obtidos nas diferentes fases mostram como diferentes propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, máxima deformação e tensão de ruptura trativa) se comportam em função da temperatura e da fração volumétrica de SMA.



## **ABSTRACT**

The Shape Memory Alloys - SMA - are materials with the ability to recover a certain geometric form previously established upon heating. This singular behavior enables their application in many situations, from orthodontic arches and medical instruments to adaptative structures for shape and vibration control. Due to the complexity of their thermomechanical behavior the thermomechanical characterization of the SMA is a fundamental step in the development of applications based on SMA. In the development of adaptative structures for shape and vibration control the shape memory alloy hybrid composites - SMAHC - is the most promising way to explore these alloys. Therefore, in addition to the complexity of the thermomechanical behavior of the SMA the SMAHC materials involves the complexity of the composite too, becoming the thermomechanical characterization even more necessary. The aim of the present work is to characterize thermomechanically SMAHC materials. Such characterization consists, basically, of obtaining stress-strain curves for different combinations matrix/SMA wires at different temperatures (in martensitic and austenitic phases). A comparative analysis of the obtained results in the different phases show how the different mechanical properties (elastic modulus, ultimate strain and ultimate tensile stress) behave as function of temperature and SMA volume fraction.

# SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1 – CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO</b>	<b>1</b>
<b>1.2 – OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>1.3 – METODOLOGIA</b>	<b>3</b>
<b>1.4 - ESTRUTURA DO TRABALHO</b>	<b>4</b>
<b>2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
<b>2.1 – ESTRUTURAS ADAPTATIVAS</b>	<b>5</b>
<b>2.2 – MATERIAIS FUNCIONAIS</b>	<b>7</b>
<b>2.2.1 Materiais Piezoelétricos</b>	<b>8</b>
<b>2.2.2 Fluidos Eletroreológicos</b>	<b>9</b>
<b>2.2.3 - Fluidos Magnetoreológicos</b>	<b>9</b>
<b>2.3 - LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA</b>	<b>10</b>
<b>2.3.1 – As Ligas NiTi</b>	<b>11</b>
<b>2.3.2 – Transformação Martensítica</b>	<b>12</b>
<b>2.3.3 - Comportamento Termomecânico das SMA</b>	<b>13</b>
<b>2.3.4 - A Peseudoelasticidade</b>	<b>16</b>
<b>2.3.5 - Efeito Memória de Forma - SME (<i>Shape Memory Effect</i>)</b>	<b>17</b>
<b>2.3.6 - Aplicações Diversas das SMA</b>	<b>19</b>
<b>2.3.7 - Aplicações de SMA Para Controle de Vibração</b>	<b>19</b>
<b>2.3.7.1 - Controle Ativo de Vibrações via SMA</b>	<b>20</b>
<b>2.3.7.2 - Controle Passivo de Vibrações via SMA</b>	<b>21</b>
<b>2.3.7.3 - Controle Adaptativo de Vibrações via SMA</b>	<b>22</b>
<b>2.3.7.4 - Controle Híbrido de Vibrações via SMA (Ativo/Passivo)</b>	<b>23</b>
<b>2.4 – MATERIAIS COMPÓSITOS</b>	<b>25</b>
<b>2.4.1 – Fibras</b>	<b>27</b>
<b>2.4.2 – Matrizes</b>	<b>28</b>
<b>2.4.3 – Aplicações de Materiais Compósitos</b>	<b>29</b>
<b>2.5 - COMPÓSITOS HÍBRIDOS COM MEMÓRIA DE FORMA (SMAHC)</b>	<b>30</b>
<b>2.5.1 Aplicações dos Materiais SMAHC</b>	<b>31</b>

2.5.2 - Comportamento Elástico dos Materiais SMAHC	33
2.5.3 - Modelo Constitutivo para SMAHC	35
<b>3 – MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>40</b>
3.1 – FIOS DE SMA – LIGA NITI	40
3.1.1 - Tratamento da Liga de SMA	40
3.2 – CORPOS DE PROVAS - SMAHC	40
3.3 – A MEDIDA DA TEMPERATURA DO FIO DE SMA	49
3.4 – ENSAIO DE TRAÇÃO	50
<b>4 – ANÁLISE TERMOMECÂNICA DE MATERIAIS SMAHC</b>	<b>52</b>
4.1 – COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO FIO NiTi	52
4.2 – COMPORTAMENTO MECÂNICO DA RESINA	55
4.3 – COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO SMAHC	56
4.3.1 - COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO CPSMAHC1	57
4.3.2 - COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO CPSMAHC2	58
4.3.3 - COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO CPSMAHC3	59
4.3.4 - COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO CPSMAHC4	60
4.4.5- COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO CPSMAHC5	61
4.4.6 - COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO CPSMAHC6	62
4.5 - ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES TERMOMECÂNICAS	65
<b>5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</b>	<b>70</b>
5.1 – CONCLUSÕES	70
5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>73</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Dimensões para cp's em forma de barras (ASTM D3039-76).	41
Tabela 3.2. Espessuras recomendadas para vários tipos de reforços (ASTM D3039-76).	41
Tabela 3.3. Propriedades da resina epóxi Silaex.	46
Tabela 4.1. Propriedades mecânicas do fio NiTi – $T = 25^{\circ}\text{C} < M_f$ .	54
Tabela 4.2. Propriedades mecânicas do fio NiTi – $T = 75^{\circ}\text{C} > A_f$ .	54
Tabela 4.3. Propriedades Mecânicas da Resina.	56
Tabela 4.4. Frações Volumétricas dos cp's (corpos de prova compósitos híbridos).	57
Tabela 4.5. Propriedades dos CPSMAHCF - $T = 25^{\circ}\text{C}$ .	63
Tabela 4.6. Propriedades dos CPSMAHCQ - $T = 75^{\circ}\text{C}$ .	64

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama esquemático de uma estrutura adaptativa.	6
Figura 2.2 – Evolução da fração da Martensita com a temperatura – esquemática.	13
Figura 2.3 – Transformação de fases nas SMA.	14
Figura 2.4 – Variação de $A_s$ com % peso de níquel na liga NiTi (Turner, 2000).	15
Figura 2.5 – Módulo de elasticidade versus temperatura (Turner, 2000).	16
Figura 2.6 – Curva Tensão-Deformação pseudoelástica esquemática.	17
Figura 2.7 – Curva tensão deformação quasiplástica esquemática.	18
Figura 2.8 – Ilustração do efeito memória de forma.	18
Figura 2.9 – Isolador de vibração pseudoelástico com um grau de liberdade – Esquemático.	22
Figura 2.10 – Esquema e conceito de projeto do absorvedor TVA (Williams et al. 2002).	25
Figura 2.11 – Classificação dos materiais compósitos (Daniel & Ishai, 1994).	27
Figura 2.12 – Pás de moinho com material compósito (MATTHEUS & RAWLINGS, 1994).	29
Figura 2.13 – Ponte de compósito (MENDONÇA, 2005).	30
Figura 2.14 – Placas de compósitos com fios de SMA embebidos.	30
Figura 2.15 – Estrutura de uma ponte com atuadores de SMA (FERNANDES, 2006).	32
Figura 2.16 – Esquema representativo do rotor e do mancal (ZAK et al, 2003).	33
Figura 2.17 - Esquema dos eixos das coordenadas cartesianas na matriz (FARIA, 2007).	34
Figura 2.18. Representação de um elemento de volume SMAHC.	36
Figura 3.1 – Dimensões dos cp's com base na norma ASTM D3039-76.	41
Figura 3.2 – Cp's de SMAHC, dimensões em mm.	42
Figura 3.3 – Esquema do molde completo para fabricação de CP de SMAHC.	42
Figura 3.4 – Dimensionamento de molde de CP para caracterização estática de SMAHC , dimensões em mm.	43
Figura 3.5 – Detalhamento esquemático do bloco-guia de número ímpar de fios de SMA, dimensões em mm.	43
Figura 3.6 – Detalhamento esquemático do bloco-guia de número par de fios de SMA, dimensões em mm.	44
Figura 3.7. Bloco guia de alumínio utilizado para o direcionamento dos fios.	44
Figura 3.8. Detalhe do parafuso trava utilizado para o correto tensionamento dos fios	45

Figura 3.9 – Detalhamento do suporte de fixação e parafuso de estiramento dos fios de SMA, dimensões em mm.	45
Figura 3.10 - Detalhamento esquemático do parafuso trava de fios de SMA no suporte de fixação, dimensões em mm.	45
Figura 3.11. Preenchimento do molde com resina epóxi.	47
Figura 3.12. Moldes montados.	47
Figura 3.13. Cura da resina para confecção dos <i>tabs</i> .	48
Figura 3.14. cp's prontos para o ensaio na fase Austenita.	49
Figura 3.15 - Aparato para medir a temperatura do fio de SMA	50
Figura 3.16. Esquema de ligação em série de um CP com três fios de SMA.	51
Figura 3.17. Máquina hidráulica de tração MTS – 810.	51
Figura 4.1 – Curvas tensão-deformação para $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C} < M_f$ .	53
Figura 4.2 – Curva tensão-deformação média - $T = 25^{\circ}\text{C} < M_f$ .	53
Figura 4.3 – Curvas tensão-deformação para $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C} > A_f$ .	53
Figura 4.4 – Curva tensão-deformação média - $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C} > A_f$ .	54
Figura 4.5 – Comparação entre as curvas tensão - deformação médias a $T < M_f$ e $T > A_f$ .	55
Figura 4.6 – Curvas Tensão-Deformação resina.	55
Figura 4.7 Curvas Tensão-Deformação médios resina.	56
Figura 4.8 - Curvas Tensão-Deformação média do SMAHC1F.	57
Figura 4.9 - Curvas Tensão-Deformação média do SMAHC1Q.	58
Figura 4.10 - Curvas Tensão-Deformação do SMAHC2F.	58
Figura 4.11 - Curvas Tensão-Deformação do SMAHC2Q.	59
Figura 4.12 - Curvas Tensão-Deformação do CPSMAHC3F.	59
Figura 4.13 - Curvas Tensão-Deformação do CPSMAHC3Q.	60
Figura 4.14 - Curvas Tensão-Deformação do CPSMAHC4F.	60
Figura 4.15 - Curvas Tensão-Deformação do CPSMAHC4Q.	61
Figura 4.16 - Curvas Tensão-Deformação do CPSMAHC5F.	61
Figura 4.17 - Curvas Tensão-Deformação do CPSMAHC5Q.	62
Figura 4.18 - Curvas Tensão-Deformação do CPSMAHC6F.	62
Figura 4.19 - Curvas Tensão-Deformação do CPSMAHC6Q.	63
Figura 4.20. Região do rompimento dos <i>tabs</i> .	64
Figura 4.21 - Evolução do $E_c$ em função da $\xi_{SMA} - T = 25^{\circ}\text{C}$ .	65
Figura 4.22- Evolução do $E_c$ em função de $\xi_{SMA} - T = 75^{\circ}\text{C}$ .	65

Figura 4.23 - Evolução do $E_c$ em função de $\zeta_{SMA} - T = 25^\circ\text{C}$ e $T = 75^\circ\text{C}$ .	66
Figura 4.24 - Evolução do $\%Al$ em função da $\zeta_{SMA} - T = 25^\circ\text{C}$ .	67
Figura 4.25 - Evolução do $\%Al$ em função de $\zeta_{SMA} - T = 75^\circ\text{C}$ .	67
Figura 4.26 - Evolução do $\%Al$ em função de $\zeta_{SMA} - T = 25^\circ\text{C}$ e $T = 75^\circ\text{C}$ .	68
Figura 4.27 - Evolução da $\sigma_{rup.}$ em função da $\zeta_{SMA} - T = 25^\circ\text{C}$ .	68
Figura 4.28 - Evolução da $\sigma_{rup.}$ em função de $\zeta_{SMA} - T = 75^\circ\text{C}$ .	69
Figura 4.29 - Evolução da $\sigma_{rup.}$ em função de $\zeta_{SMA} - T = 25^\circ\text{C}$ e $T = 75^\circ\text{C}$ .	69

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES.

$A_S$	Temperatura inicial de formação da austenita	[°C]
$A_f$	Temperatura final de formação da austenita	[°C]
$M_S$	Temperatura inicial de formação da martensita	[°C]
$M_f$	Temperatura final de formação da martensita	[°C]
$T$	Temperatura	[°C]
$T_1$	Temperatura de referência da pseudoelasticidade	[°C]
$V_m/V$	Fração volumétrica da fase martensítica	
$F_c$	Carga suportada pelo compósito	[N]
$F_f$	Carga suportada pelas fibras	[N]
$F_m$	Carga suportada pela matriz	[N]
$A_c$	Área da seção transversal do compósito	[m <sup>2</sup> ]
$A_f$	Área da seção transversal das fibras	[m <sup>2</sup> ]
$A_m$	Área da seção transversal da matriz	[m <sup>2</sup> ]
$A_f/A_c$	Razão de área das fibras	
$A_m/A_c$	Razão de área da matriz	
$V_f$	Fração volumétrica das fibras	
$V_m$	Fração volumétrica da matriz	
$E$	Módulo de elasticidade (Young)	[GPa]
$E_f$	Módulo de elasticidade das fibras	[GPa]
$E_c$	Módulo de elasticidade do compósito	[GPa]
$E_m$	Módulo de elasticidade da matriz	[GPa]
$E_{exp.}$	Módulo de elasticidade experimental	[GPa]
$E_{teor}$	Módulo de elasticidade teórico	[GPa]

### Símbolos Gregos

$\sigma$	Tensão	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{A-M}$	Tensão associada à transformação de fase austenita-martensita	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{M-A}$	Tensão associada à transformação de fase austenita-martensita	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_P$	Ponto de escoamento plástico da martensita	[N/m <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$	Deformação	
$\varepsilon_c$	Deformação do compósito	
$\varepsilon_f$	Deformação das fibras	
$\varepsilon_m$	Deformação da matriz	
$\varepsilon_{máx}$	Deformação máxima do corpo de prova	
$\sigma_c$	Tensão suportada pelo compósito	[N/m <sup>2</sup> ]



$\sigma_f$	Tensão suportada pelas fibras	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{rup.}$	Tensão de ruptura do corpo de prova	[MPa]
$\sigma_m$	Tensão suportada pela matriz	[N/m <sup>2</sup> ]
$\xi_{SMA}$	Fração volumétrica da matriz	

# 1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os aspectos gerais sobre as ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys – SMA*), contexto no qual o presente trabalho se insere, bem como as motivações para o seu desenvolvimento. Os objetivos do trabalho são estabelecidos, assim como a metodologia para alcançá-los descrito. Por fim apresentação da estrutura básica deste trabalho.

## 1.1 – CONTEXTO E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

As estruturas adaptativas são estruturas capazes de se adaptar ao meio ambiente, alterando sua forma, posição, rigidez e outras propriedades com o auxílio de sensores, atuadores e sistemas de controle, buscando a otimização do processo através de uma integração sinérgica (JANOCHA, 1999). Conseqüentemente, essa integração capacita o sistema a responder de modo controlado a excitações externas ou sinais de controle, procurando compensar os efeitos que afastariam sua resposta dos parâmetros aceitáveis (BANKS et al., 1996).

Nas últimas décadas o desenvolvimento de estruturas adaptativas tem demandado cada vez mais o emprego de materiais funcionais (ROGERS, 1993). Estes materiais têm a capacidade de sofrer alterações de propriedades em função de estímulos do ambiente ou de sinais de controle (ROGERS, 1993; JANOCHA, 1999). Tais modificações de propriedades possibilitam o seu emprego em diversas áreas, desde a médica à indústria aeroespacial (BARNES, 2006). Entre os materiais funcionais podem-se citar as cerâmicas piezoelétricas, os materiais magneto-strictivos, os fluidos eletro-reológicos, magneto-reológicos, as ligas com memória de forma, dentre outros (JANOCHA, 1999). Entre os materiais funcionais as ligas com memória de forma apresentam grande potencial de aplicação para o controle de forma e o controle de vibração (GANDHI & THOMSON, 1994). Por isso elas são o foco deste trabalho.

O emprego de materiais funcionais no desenvolvimento de estruturas adaptativas surge devido às limitações dos sensores e atuadores convencionais (CLARK et al., 1998). Avanços tecnológicos na engenharia levaram ao desenvolvimento de sistemas que empregam formas avançadas de sensores e atuadores em conjunto, objetivando melhor desempenho da estrutura ou do componente estrutural (CLARK et al., 1998).

As SMA apresentam a capacidade de recuperarem a forma original após deformação quasiplástica, através aquecimento (FUNAKUBO, 1987). Se esta recuperação for impedida de alguma maneira, forças elevadas podem ser geradas por meio do efeito memória de forma. Devido à característica de gerar força, as ligas de SMA podem ser utilizadas como atuadores termomecânicos (FUNAKUBO, 1987).

As SMA oferecem, devido à capacidade de reagir a estímulos externos como tensão mecânica e temperatura, um amplo campo de aplicação, tais como: indústria aeroespacial, robótica, aplicações biomédicas e outras (BORDEN, 1991; NORBERT et al., 1992;). Alguns exemplos de materiais que podem apresentar o efeito memória de forma são: NiTi, ZnCuAl e CuAlNi.

A primeira observação do efeito memória de forma foi realizada por Chang e Read em 1932 (ZHAO, 2001). Eles observaram a reversibilidade da transformação martensítica na liga AuCd através de análises metalográficas e resistivas, e em 1951 o efeito memória de forma foi observado em uma barra de AuCd (FUNAKUBO, 1987). No ano de 1938, a transformação foi observada em ligas de bronze (ROGERS & ROBERTSHAW, 1988). Entretanto, somente após 1962, quando Buehler et al (1963) observaram o efeito memória de forma nas ligas de NiTi, houve um grande avanço na pesquisa em SMA, e as pesquisas em metalurgia e potenciais aplicações começaram de fato a se aprofundar. No Brasil os primeiros trabalhos surgiram apenas no começo da década de 80 (FERNANDES, 2003).

Fundamentalmente, duas fases estão presentes nestas ligas: austenita e martensita (DELAEY et. al. 1974), indicam a formação de vinte e quatro variantes de martensita a partir do resfriamento da austenita. Com a aplicação de uma carga, tem-se um processo de reorientação (*detwinning*) das variantes de martensita obtidas inicialmente em uma única, que obedece à direção preferencial, dada pelo alinhamento dos planos preferenciais com a direção principal do carregamento (KRISHNAN et al., 1974).

Pesquisas recentes demonstraram que os componentes fabricadas de ligas com memória de forma podem ser integrados com sucesso a elementos estruturais, com a função de melhorar ou controlar características, como módulo de elasticidade e a frequência natural (Zak et al, 2003). A proposta feita por Rogers (1988) para uma nova classe de aplicação de materiais quando se analisaram atuadores de SMA embebidos em estruturas compósitas, passou a ser conhecida na literatura como SMAHC (*Shape Memory Alloy Hybrid Composite*).

As mudanças nas características das SMA são obtidas em decorrência dos fenômenos observados nestas ligas. Por exemplo, o controle de força de atuadores pode ser explorado em função do efeito memória de forma, e o controle vibracional pode ser melhorado em decorrência da variação do módulo de elasticidade em função da variação da temperatura da SMA, ou então, apresentar uma grande diminuição da vibração em função da alta capacidade das SMA em absorver energia no regime pseudoelástico (Zak et al, 2003). Além disso, as propriedades das SMA podem ser exploradas no controle ativo ou na manipulação de modo preciso de parâmetros estáticos e dinâmicos de elementos estruturais, tais como, frequências naturais, modos de vibração e amplitudes de vibrações (Zak et al, 2003).

O foco principal deste trabalho são os materiais SMAHC, que têm recebido uma atenção especial por parte da comunidade científica nos últimos anos (PAINE & ROGERS, 1994; TURNER, 2000).

## **1.2 - OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é confeccionar e caracterizar termomecanicamente compósitos híbridos com memória de forma (SMAHC). A caracterização consiste do levantamento de curvas tensão-deformação para diferentes frações volumétricas de SMA a diferentes temperaturas ( $T < M_f$  e  $T > A_f$ ) e desenvolver uma análise comparativa entre os resultados obtidos para  $T < M_f$  e  $T > A_f$  visando estabelecer uma comparação entre as propriedades dos materiais em função da fração volumétrica de SMA.

## **1.3 - METODOLOGIA**

Utilizando o laboratório de materiais funcionais e estrutura adaptativa da Universidade de Brasília (LabMAFEA), um molde foi concebido e confeccionado, em alumínio, para a fabricação dos corpos de provas (cp's). Compósitos poliméricos reforçados com fios de NiTi foram confeccionados com diferentes frações volumétricas de SMA a fim de observar a sua influência nas propriedades em função da variação para  $T < M_f$  e  $T > A_s$ .

Curvas Tensão - Deformação dos materiais SMAHC foram traçadas com os resultados obtidos dos ensaios de tração e por fim, gráficos comparativos das diferentes configurações foram analisados e comparados.

#### **1.4 - ESTRUTURA DO TRABALHO**

O presente trabalho foi dividido em cinco capítulos. O primeiro apresenta a contextualização do problema, as motivações para o desenvolvimento do trabalho, os objetivos e as diretrizes metodológicas a serem seguidas.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre ligas com memória de forma, assim como seu comportamento termomecânico e suas aplicações. Aborda também as estruturas adaptativas e os materiais funcionais, apresentando uma descrição dos materiais compósitos, com atenção especial aos compósitos com fibras contínuas e alinhadas, que se enquadram nos casos analisados neste trabalho. E por fim uma revisão dos materiais compósitos híbridos com memória de forma.

Apresentam-se no Capítulo 3 os materiais e métodos, além das características dos fios de NiTi e da resina utilizados neste trabalho, e os procedimentos para a fabricação do molde e dos cp's.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de tração, bem como uma análise comparativa entre os resultados obtidos para  $T < M_f$  e  $T > A_s$ . Finalmente no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## **2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

As estruturas adaptativas são definidas como estruturas projetadas com atuadores e sensores distribuídos e diretamente relacionados por um controlador capaz de alterar dinamicamente sua resposta a variações das condições ambientais ou de operação (JANOCHA, 1999).

Os materiais funcionais são materiais que, quando estimulados externamente sofrem alterações de algumas propriedades como a viscosidade, volume, rigidez, resistência elétrica e a condutividade, por exemplo, (ROGERS, 1993), e podem ser aplicados como sensores e/ou atuadores. Nesse contexto, podem-se destacar as ligas com memória de forma, que possuem a capacidade de retornar à sua forma previamente definida através das variações de temperatura.

É grande a variedade de materiais disponíveis para uso em engenharia, porém, inseridos neste trabalho, os materiais compósitos têm grande relevância, pois são constituídos de fibras de reforço, com orientação definida ou não, disposta em matriz polimérica, cerâmica ou metálica (ROGERS, 1993).

Este trabalho enfoca as estruturas SMAHC com fios de SMA sem pré-deformação, e explora a variação do seu módulo de elasticidade através da variação temperatura.

### **2.1 - ESTRUTURAS ADAPTATIVAS**

São conhecidas como estruturas adaptativas ou estruturas inteligentes, aquelas que têm a capacidade de perceber alterações nas condições operacionais ou ambientais através de sensores, e promover adaptações através de atuadores, visando manter um comportamento satisfatório dentro de parâmetros pré-determinados (JANOCHA, 1999).

Uma estrutura adaptativa é constituída de três elementos fundamentais: o controlador, os sensores e os atuadores. A Figura 2.1 mostra de maneira esquemática um modelo de estrutura adaptativa, cuja função é receber informações enviadas pelos sensores, com finalidade de monitorar qual é a situação atualizada do processo ou da máquina e enviar estas informações ao controlador. Este procedimento pode conter várias etapas, como por exemplo, a de conversão de sinais.

Os sensores destinam-se a captar alterações ambientais e operacionais para em seguida informá-los a um sistema de controle (ROGERS, 1993). São largamente usados na

medicina e na indústria para medir deformação, temperatura, umidade etc. Podem-se apontar como exemplos os sensores convencionais piezelétricos e os sensores de fibra óptica (GHANDI & THOMPSON, 1994).

Os atuadores são os elementos que produzem movimento, atendendo a comandos que podem ser manuais ou automáticos (JANOCHA, 1999). Assim, atuadores podem ser aplicados em estruturas para posicionamento, controle de vibração, variação na rigidez e alteração de forma, entre outras (GHANDI & THOMPSON, 1994). Como exemplo, dos atuadores convencionais podem-se citar atuadores pneumáticos e hidráulicos (GHANDI & THOMPSON, 1994).

O controlador central recebe a informação através dos sensores, executa uma lógica pré-definida e só então envia uma resposta para os atuadores. Em seguida, o controlador toma decisões, e por sua vez, interfere em determinada propriedade para alterar o comportamento do processo de modo que a situação atual se iguale ou se aproxime da situação desejada (GHANDI & THOMPSON, 1994).

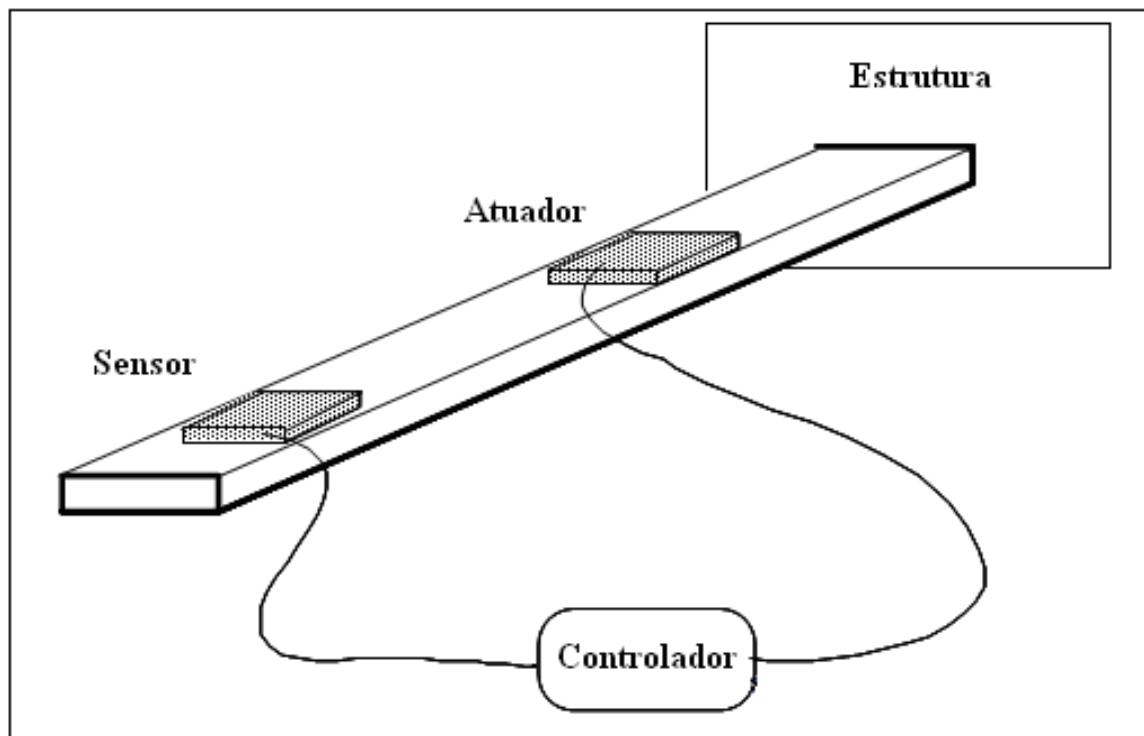


Figura 2.1. Diagrama esquemático de uma estrutura adaptativa.

Como exemplo de materiais funcionais, as SMA apresentam-se como fortes candidatas ao desenvolvimento de estruturas adaptativas para controle de vibração e o controle de forma (ZAK et al., 2003)

## 2.2 - MATERIAIS FUNCIONAIS

Os materiais funcionais são materiais capazes de realizar determinadas funções através de estímulos externos ou por sinais de controle, e são essas propriedades que têm despertado a atenção da comunidade científica para diversas aplicações (GHANDI, 1992). São exemplos dessa classe os materiais piezelétricos, os fluidos eletroreológicos, e os fluidos magnetoreológicos e as ligas com memória de forma (*SMA – Shape Memory Alloys*) (JANOCHA, 1999). As possibilidades de aplicação e as áreas de possível utilização dos materiais funcionais são diversas, tais como a indústria aeroespacial, esportiva, dos veículos motorizados e máquinas rotativas (BANKS et. al., 1996).

Um estímulo dado a esses materiais, como por exemplo, uma corrente elétrica ou um campo magnético, tensão mecânica ou variação de temperatura, entre outras possibilidades, quando aplicados corretamente dentro de uma faixa de trabalho útil, modificarão uma ou mais propriedades físico-químicas do material em resposta ao mesmo (GHANDI, 1992). Os materiais funcionais apresentam maiores vantagens em relação aos sensores e atuadores convencionais, por sua capacidade de resposta a estímulos externos, podendo ser aplicados como sensores ou atuadores e em alguns casos exercem ambas as funções simultaneamente (GHANDI & THOMPSON, 1994).

O objetivo da aplicação de materiais funcionais em estruturas é o controle de propriedades mecânicas que podem sofrer alterações, devido a ações externas, com a finalidade de manter o funcionamento da estrutura dentro de padrões pré-estabelecidos (JANOCHA, 1999). Assim, devido às limitações dos materiais convencionais, novas pesquisas sobre materiais funcionais estão sendo desenvolvidas para utilização em estruturas adaptativas, objetivando um melhor desempenho da estrutura ou do componente estrutural (JANOCHA, 1999).

Muitos sucessos com os materiais funcionais já foram obtidos (GHANDI 1992). O grande desafio é obter materiais que se ajustem por conta própria, ou se adaptem a certas condições do meio-ambiente (ROGERS, 1993). Por exemplo, uma ponte poderia reforçar-se e selar suas rachaduras por conta própria durante um terremoto, tal como um carro com “zonas de amasso inteligente” teria a capacidade de retornar à sua forma original após um acidente, usando como estímulo para o processo um campo elétrico, um campo magnético ou uma fonte de calor (GHANDI, 1992). Na construção civil aumentaria a segurança nas estruturas como, por exemplo, em pontes e em prédios. Neste caso esses materiais poderiam mudar de cor ao detectar peso excessivo ou condições desfavoráveis à segurança,



antes que qualquer acidente aconteça (ROGERS, 1988). Também em peças de automóveis os materiais inteligentes poderiam ser usados para caracterizar o desgaste dessas peças e alertar para a necessidade da sua reposição (ASUNDI, 1996). A tendência é que, assim como os seres vivos, estes sistemas se adaptem às necessidades e melhorem qualquer dano possível ou compensem a falha de elementos individuais (ROGERS, 1993).

As diversas aplicações dos materiais funcionais podem ser também em motores de automóveis, equipamentos eletrônicos ou aviões (ASUNDI, 1996). Muitas pesquisas também são direcionadas para utilização dos materiais inteligentes em áreas da medicina e da odontologia, tais como a localização de tumores, a correção de problemas de coluna, o uso em aparelhos ortodônticos e em placas para prótese ortopédica (ROGERS, 1993).

A seguir são apresentadas breves descrições dos materiais funcionais, e no item 2.3 uma descrição mais detalhada das SMA, foco deste trabalho.

### **2.2.1 - MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS**

Os materiais piezoelétricos são materiais que apresentam o fenômeno da piezoelectricidade, ou seja, desenvolvem um campo elétrico quando submetidos a esforços mecânicos externos (efeito piezoelétrico direto) e, inversamente, apresentam uma deformação quando submetidos a um campo elétrico (efeito piezoelétrico inverso) (JANOCHA, 1999).

Os materiais piezoelétricos pertencem à classe dos dielétricos, que exibem significativas deformações em resposta a um campo elétrico aplicado e, inversamente, produzem polarização elétrica em resposta às tensões mecânicas (JANOCHA, 1999). Vários tipos de materiais, naturais e sintéticos, exibem propriedades piezoelétricas, como por exemplo, as cerâmicas piezoelétricas (como a PZT - Titanato Zirconato de Chumbo) e os polímeros piezoelétricos (como o PVDF - Fluorido de Polivinilideno) (GHANDI & THOMPSON, 1994).

A relação entre o campo elétrico e a deformação é aproximadamente linear para baixas intensidades de campo elétrico (GHANDI & THOMPSON, 1994), o que é uma característica vantajosa quando se utiliza o efeito piezoelétrico em sistemas de controle. Entretanto, para maiores intensidades de campo elétrico, ocorre um fenômeno de saturação da polarização com a inversão dos dipolos elétricos (MOULSON & HERBERT, 1990). Isto leva a uma significativa histerese e relações não-lineares entre campo elétrico e deformação, fato que pode causar dificuldades no uso de atuadores piezoelétricos em

procedimentos de controle que requerem elevadas intensidades de campo elétrico. Todavia, a maioria das aplicações práticas limita-se ao regime linear. Esses efeitos têm sido usados por anos na mecânica automotiva e na microeletrônica (JANOCHA, 1999).

### **2.2.2 - FLUIDOS ELETROREOLÓGICOS**

Os fluidos eletroreológicos fazem parte de uma ampla classe de dispersões fluidas que apresentam significativas e reversíveis alterações nas suas características reológicas quando submetidos a um campo elétrico externo (JANOCHA, 1999). Estes fluidos são dispersões coloidais de partículas sólidas em um meio fluido isolante, sendo as dimensões das partículas geralmente menores que  $100\mu\text{m}$  e superiores às dimensões das partículas do solvente (WHITTLE et al., 1995). Diferentes combinações solvente/soluto apresentam propriedades eletroreológicas como, por exemplo, partículas inorgânicas de sílica e óxidos metálicos ou partículas orgânicas de celulose micro-cristalina e resinas iônicas em óleo, querosene ou hidrocarbonetos hidrogenados (GHANDI & THOMPSON, 1994). Frequentemente as partículas sólidas são recobertas com compostos ativadores orgânicos (água ou outros compostos polares, como o etanol) para aumentar a capacidade de polarização. A resposta eletroreológica é devida a alguma forma de polarização induzida e subsequente interação entre as partículas (CARLSON & SPENCER Jr., 1996).

As partículas sólidas dos fluidos eletroreológicos, quando submetidos a um campo elétrico entre duas superfícies metálicas isoladas, apresentam tendência de se alinhar ao campo, resultando em estruturas fibrilares e apresentam aumento na resistência ao fluxo quando submetidos à ação de campo elétrico. O estado sólido permanece até que seja aplicada uma tensão de cisalhamento maior que a tensão de escoamento (WHITTLE et al., 1995). A utilização desses fluidos como atuadores deve-se à possibilidade de se alterar a tensão limite de cisalhamento e a viscosidade mediante a aplicação do campo elétrico externo. Atualmente as aplicações de fluidos eletroreológicos estão voltadas para o desenvolvimento de sistemas de transmissão e suspensão veicular pela indústria automobilística (JANOCHA, 1999).

### **2.2.3 - FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS**

Os fluidos magnetoreológicos têm suas propriedades de viscosidade e fluxo facilmente alteradas pela aplicação de uma corrente elétrica que induz um campo

magnético (WHITTLE et al., 1995). Os fluidos magnetoreológicos são dispersões de partículas ferromagnéticas, de formato esférico ou elipsoidal, com diâmetro em torno de 1 a 5µm, distribuídas aleatoriamente em um líquido orgânico ou aquoso isolante. Normalmente, o líquido utilizado é um óleo (JANOCHA, 1999).

Os fluidos magnetoreológicos, quando submetidos a um campo magnético, apresentam a tendência de suas partículas se alinharem com as linhas do campo. Assim, quando o fluido é mantido entre dois pólos magnéticos, as correntes de partículas restringem seu movimento, perpendicular à direção do fluxo e aumentando sua viscosidade (GHANDI & THOMPSON, 1994). As propriedades mecânicas do fluido submetido ao campo magnético são anisotrópicas. Assim, é fundamental assegurar que as linhas do fluxo sejam perpendiculares à direção do movimento a ser restringido (SRINIVASAN & MC FARLAND, 2001).

As principais aplicações dos fluidos magnetoreológicos são o controle ativo de vibrações e a transmissão de torque. Para estas aplicações, as propriedades reológicas dos fluidos, a modalidade de trabalho do dispositivo, o projeto do circuito magnético, o guia do fluxo e a configuração da bobina são parâmetros fundamentais para o funcionamento dos dispositivos (JANOCHA, 1999).

E não por acaso, os fluidos magnetoreológicos já são aplicados diretamente na indústria: as alterações em sua viscosidade ocorrem em uma fração de milissegundo, muito mais rápido do que qualquer sistema mecânico convencional. Isto os torna adequados para serem utilizados no controle altamente eficaz de vibrações, seja em veículos, aeronaves, robôs ou qualquer outra aplicação atuador (SRINIVASAN & Mc FARLAND, 2001).

### **2.3 - LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA (SMA – *SHAPE MEMORY ALLOYS*)**

Em 1938 Arne Olander foi o primeiro a observar o efeito memória de forma, quando Greninger, da Universidade de Havard e Mooradian, do Massachusetts Institute of Technology, descobriram que a martensita do bronze podia ser induzida por tensão mecânica e depois desaparecer, com posterior aquecimento (OTSUKA & WAYMAN, 1998; RYHANEN, 1999). Mas foi somente após a década de 1960 que apareceram pesquisas avançadas realizadas no campo das SMA (HODGSON et al., 1990).

Em 1962, Buehler e seus colegas de trabalho do Laboratório Naval de Ordnance nos Estados Unidos, descobriram o efeito memória de forma em uma liga Níquel Titânio (NiTi), que ficou conhecida como Nitinol, uma referência às iniciais do laboratório

(HODGSON et al, 1990). Posteriormente, houve um crescente interesse pelo emprego destes materiais em aplicações que vão desde estrutura adaptativa a implantes utilizados pela medicina (MACHADO, 2002).

Particularmente, as ligas de maior importância são NiTi, CuZnAl e CuAlNi. As ligas NiTi são de maior potencial em aplicações comerciais porque combinam boas propriedades mecânicas com os fenômenos de memória de forma e biocompatibilidade (HODGSON et al., 1990).

### **2.3.1 - AS LIGAS NiTi**

As ligas NiTi são um composto intermetálico, assim como de outros elementos metálicos, além de apresentar uma deformação máxima comparável às de outras ligas metálicas (KRISHNAN et al, 1974b). Apresenta um maior número de elementos o que permite uma modificação significativa, tanto das suas propriedades mecânicas quanto das suas temperaturas de transformação (FRENZEL et al., 2004). O Ferro (Fe) e o Cromo (Cr) também são freqüentemente adicionados para baixar as temperaturas de transformação, bem como o Cobre (Cu) é usado para reduzir a histerese de transformação e diminuir a tensão de orientação da Martensita (SHAW & KYRIAKIDES, 1995). A presença de impurezas como o Oxigênio (O) e o Carbono (C) podem também alterar as temperaturas de transformação e degradar as propriedades mecânicas, o que faz com que seja desejável minimizar a presença destes elementos (FERNANDES, 2003).

Devido à elevada reatividade do Ti a fusão dessas ligas deve ser feita sob vácuo ou em atmosfera inerte, sendo comercialmente utilizadas técnicas como a fusão por arco de plasma ou por feixe de elétrons, também ainda a fusão por indução sob vácuo (FRENZEL et al., 2004). Os lingotes obtidos são depois conformados à quente por forjamento, laminação ou extrusão. A maioria dos processos de deformação a frio pode ser aplicada a estes materiais, mas a sua capacidade de encruamento é muito acentuada e torna-se, por isso, necessário fazer um recozimento. (FERNANDES, 2003).

As ligas NiTi possuem boa combinação de propriedades, como alta resistência mecânica, boa resistência à corrosão e biocompatibilidade (FRENZEL, et al., 2004).

### 2.3.2 - TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

As fases mais comuns presentes nas SMA são Austenita (A) e Martensita (M). A Figura 2.2, esquemática, mostra a evolução da fração martensítica em função da temperatura no estado livre de tensões (DELAEY et al, 1974). No geral, quatro temperaturas características de transformação são definidas:  $M_s$  (*martensite start*) e  $M_f$  (*martensite finish*), respectivamente temperaturas de início e fim da formação da Martensita. Por outro lado,  $A_s$  (*austenite start*) e  $A_f$  (*austenite finish*), correspondem às temperaturas de início e fim de formação da fase Austenita respectivamente. Durante o aquecimento, a transformação percorre a curva superior. Quando a temperatura  $A_s$  é atingida, tem-se o início de formação da Austenita. A transformação continua até atingir 100% de Austenita em  $A_f$ . No resfriamento, a transformação percorre a parte inferior da curva. Em  $M_s$  começa a formação de Martensita até atingir a temperatura  $M_f$ , em que o material é 100% martensita (DELAEY et al, 1974). A austenita é estável somente em temperaturas acima de  $A_s$  tendo uma única variante com uma estrutura de corpo-centrado (HODGSON et al, 1990). A Martensita, que é estável a temperatura abaixo  $M_s$  é induzida pela tensão ou pela temperatura. Nessa fase a liga pode ser facilmente deformada (HODGSON et al, 1990).

As mudanças que ocorrem nas estruturas cristalinas das SMA estão relacionadas diretamente com a dissipação de energia devido aos choques de discordância e à criação de defeitos cristalinos (DELAEY et al, 1974). Como resultado tem-se um ciclo de histerese na temperatura, como representado esquematicamente na curva da Figura 2.2. As temperaturas de transformação de fase são características de cada liga, e variam em função da composição química e de tratamentos termomecânicos (OTSUKA & REN, 1999; WU & LIN, 2000). Essa reversão de sentido cria um ciclo de histerese e a sua largura varia em função da composição química da liga e de tratamentos térmicos (DELAEY et al, 1974).

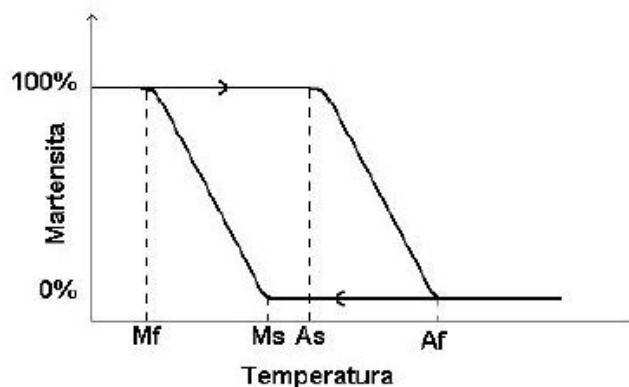


Figura 2.2 – Evolução da fração da Martensita com a temperatura – esquemática.

A quasiplasticidade é observada em temperaturas abaixo de  $M_f$ , e a pseudoelasticidade em temperaturas superiores a  $A_f$ . Estes são os dois principais fenômenos observados nas SMA, além do efeito memória de forma, observado com a variação de temperatura.

### 2.3.3 - COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DAS SMA

As SMA são ligas metálicas capazes de recuperar uma forma geométrica previamente definida, ou de desenvolver consideráveis forças de restituição ao se restringir sua recuperação através variação da temperatura e/ou de tensão, devido às transformações de fase induzidas no material (DELAEY et al, 1974).

As SMA possuem um comportamento termomecânico fortemente dependente da temperatura em que se encontram, e apresentam três comportamentos marcantes: a quasiplasticidade, a pseudoelasticidade e o efeito memória de forma (DELAEY et al, 1974). Em temperaturas abaixo de  $M_f$ , as SMA apresentam um comportamento quasiplástico, que é caracterizado por uma grande deformação residual proveniente de uma reorientação martensítica induzida mecanicamente (KRISHNAN et al, 1974). A pseudoelasticidade, por sua vez, é um comportamento caracterizado por uma recuperação de deformação após a retirada da tensão à temperaturas acima de  $A_f$ . Essas deformações são oriundas de uma transformação martensítica induzida por tensão (KRISHNAN et al, 1974). O efeito memória de forma é a recuperação da deformação quasiplástica com o aquecimento (DELAEY et al, 1974).

Comum nas ligas ferro-carbono, as transformações martensíticas são formadas quando estas ligas austenitizadas são resfriadas rapidamente até um grau de temperatura

relativamente baixo, próximo da temperatura ambiente (CALLISTER, 2000). A Martensita tem estrutura monofásica que não se encontra em equilíbrio (metaestável), resultado da transformação sem difusão. Assim no aço a transformação martensítica ocorre quando a taxa de resfriamento é rápida o suficiente para prevenir a difusão do carbono (CALLISTER, 2000).

Nos casos das SMA, quando a martensita se forma somente através da variação da temperatura, é denominada martensita maclada ou martensita *twinned*. Este tipo de martensita é uma forma cristalina potencial, que se transforma em uma determinada estrutura cristalina que dependerá das tensões impostas na mesma (DELAEY et al, 1974). Essa estrutura metalúrgica apresenta 24 variantes, isto é, 24 subtipos com orientações cristalográficas diferentes (DELAEY et al, 1974). Por outro lado, quando esta estrutura é submetida a uma tensão, estas 24 variantes da martensita *twinned* (maclada) se reorientam na direção mais favorável ao carregamento aplicado, levando a formação da martensita orientada, *detwinned* (não-maclada), como ilustra a Figura 2.3 (ZHANG et al. 1991).

Quando a martensita maclada é submetida a uma determinada tensão, ocorre a formação de martensita *detwinned*. Neste caso, ela assume uma forma cristalina relacionada ao tipo de tensão em que foi submetida, por um processo de reorientação das variantes (DELAEY et al, 1974).

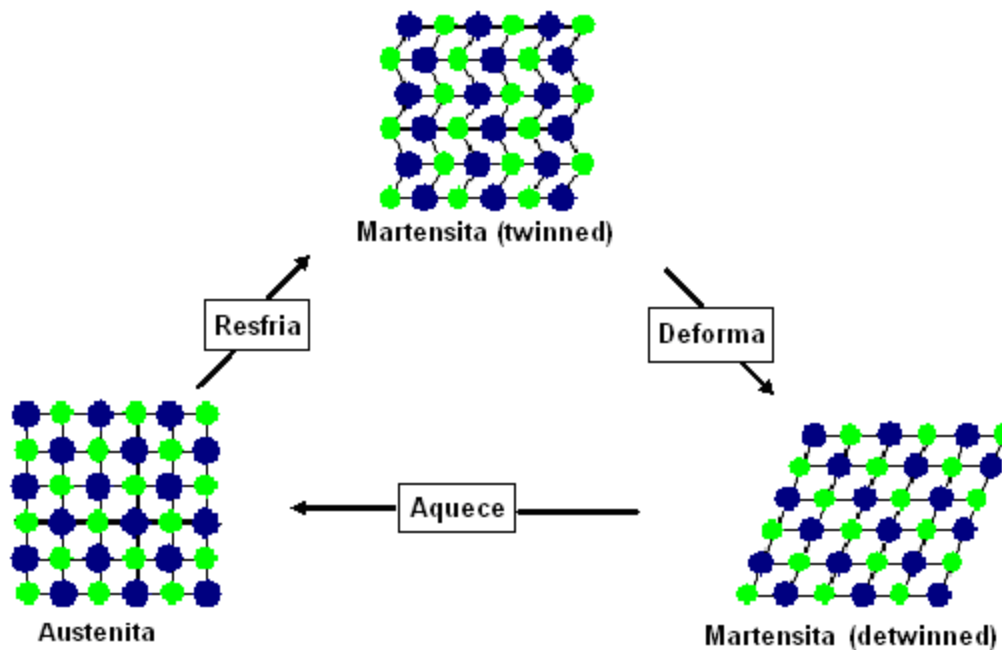


Figura 2.3 – Transformação de fases nas SMA.

As temperaturas de transformação podem ser obtidas através de calorímetros. Nesta técnica mede-se a quantidade de calor absorvida ou liberada por uma amostra ao ser sujeita a um ciclo térmico de aquecimento e de resfriamento que atavesse o intervalo de temperaturas de transformação (OLSON & COHEN 1982).

As temperaturas de transformação de uma liga também podem ser estimadas por monitoramento de praticamente qualquer propriedade da liga, como por exemplo, a resistência elétrica (TURNER, 2000). Para a liga NiTi, as temperaturas de transformação podem ser alteradas pela mudança de composição da liga (BUEHLER, 1962).  $A_s$  pode variar de  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $166^{\circ}\text{C}$  através da mudança na fração de níquel de 54,5% para 56,5% do peso total, como exemplifica a Figura 2.4 (TURNER, 2000).

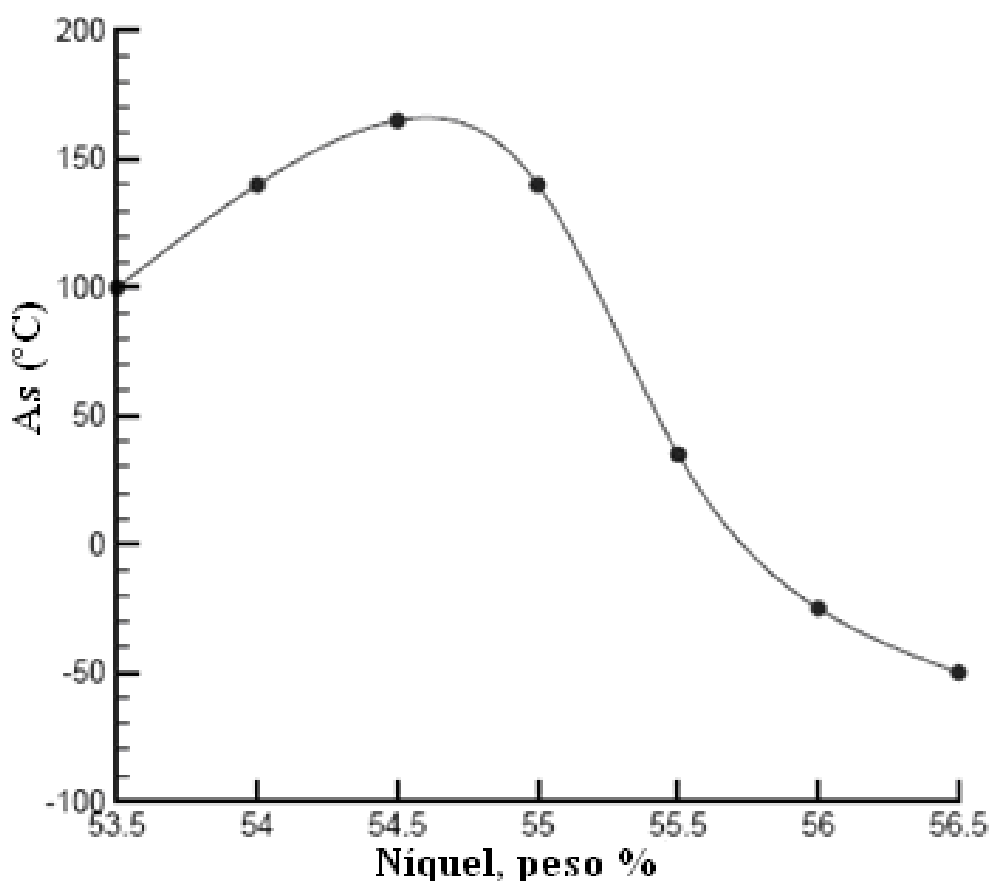


Figura 2.4. Variação de  $A_s$  com % peso de níquel na liga NiTi (Turner, 2000).

Além da recuperação de forma observada no efeito memória de forma e na pseudoelasticidade, há também uma variação no módulo de elasticidade da ordem de



$E_a \approx 3E_m$  (TURNER, 2000), onde  $E_a$  e  $E_m$  são os módulos de elasticidade da austenita e da martensita, respectivamente. Esse comportamento pode ser verificado na Figura 2.5.

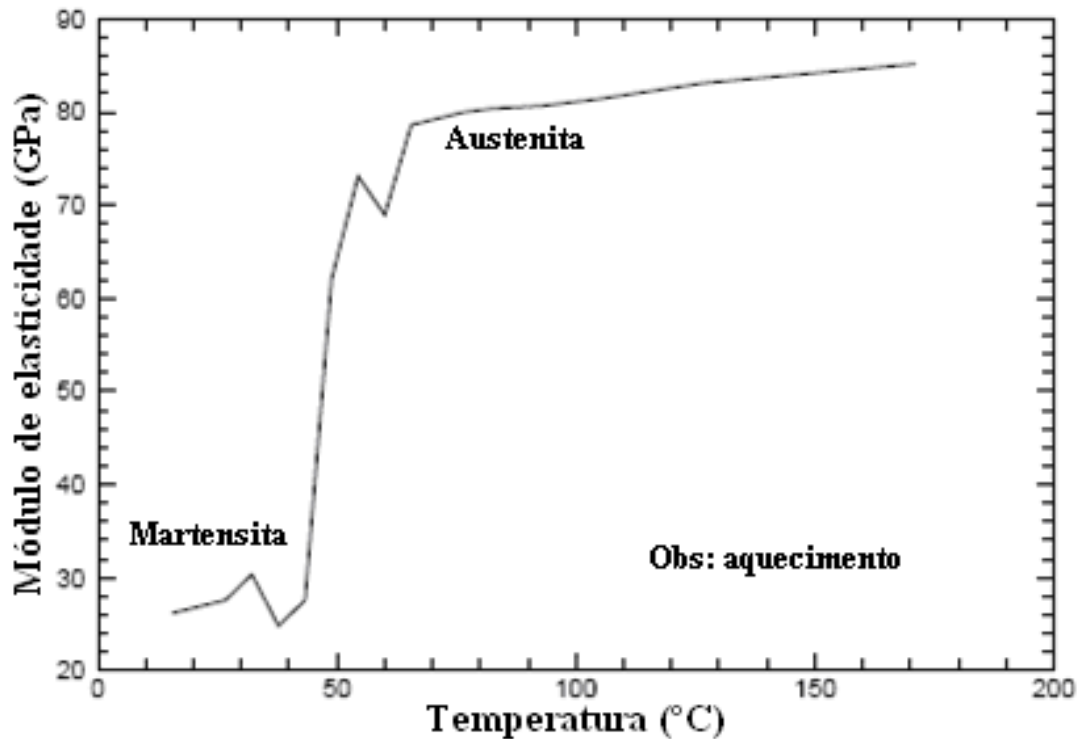


Figura 2.5. Módulo de elasticidade versus temperatura (Turner, 2000).

Observa-se também um aumento em torno de 10% na resistência elétrica ao passar da fase martensítica para a Austenita (TURNER, 2000). A variação do módulo de elasticidade é uma importante propriedade no desenvolvimento deste trabalho.

### 2.3.4 - A PSEUDOELASTICIDADE

A pseudoelasticidade é um comportamento caracterizado por uma recuperação de deformação após a retirada da carga, a temperaturas acima de  $A_f$  ( $T > A_f$ ). Essas deformações são oriundas de transformações martensíticas induzidas por tensão e por reorientação da estrutura cristalina (KRISHNAN et al, 1974). Numa configuração livre de tensões, apenas a austenita é termodinamicamente estável acima de  $A_f$  (DELAEY et al, 1974).

As deformações pseudoelásticas podem chegar a 10% em certas ligas, sendo 8% um valor típico para as ligas NiTi (KRISHNAN et al, 1974). Ao comparar estas

deformações recuperáveis da SMA à deformação recuperável típica dos materiais convencionais de engenharia, que corresponde à deformação elástica destes materiais, pode-se ter uma de idéias como é excepcional o comportamento das SMA (WAYMAN & DUERIG, 1990). A figura 2.3 ilustra este comportamento, também denominado de superelasticidade.

Ao submeter o material a uma tensão trativa, observa-se um comportamento elástico até um determinado nível de tensão  $\sigma_{A \rightarrow M}$  (Figura 2.6). A partir daí observa-se uma deformação relativamente grande com pequena variação da tensão. Ao retirar a carga, a liga retorna ao seu estado inicial, descrevendo um ciclo de histerese em tensão. A área delimitada por este ciclo tensão-deformação expressa a energia absorvida durante o processo. (KRISHNAN et al, 1974b).

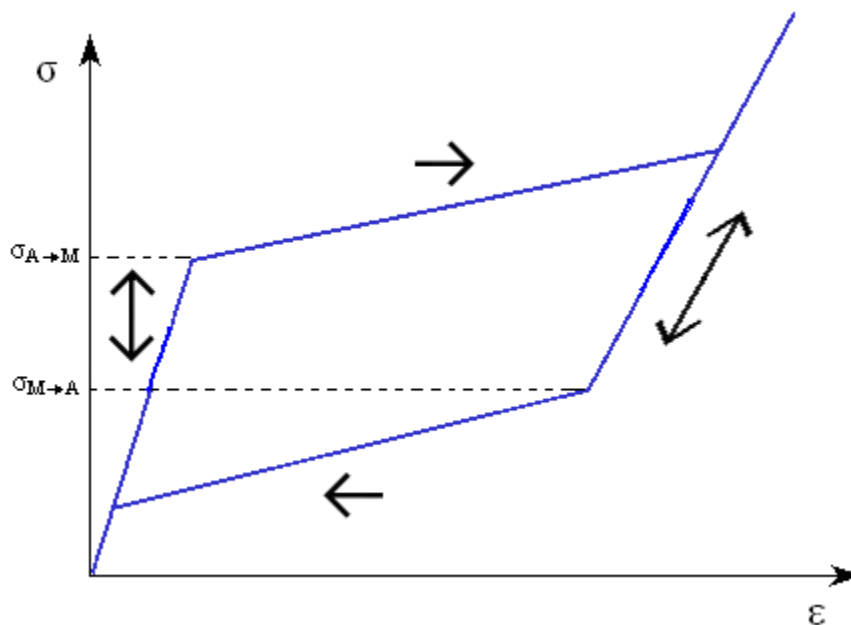


Figura 2.6. Curva Tensão-Deformação pseudoelástica esquemática.

### 2.3.5 - EFEITO MEMÓRIA DE FORMA - SME (*SHAPE MEMORY EFFECT*)

As SMA são facilmente deformadas a temperaturas abaixo de  $M_f$ , e, ao serem aquecidas a uma temperatura acima de  $A_f$  recuperam a forma inicial à deformação. Esta “lembrança” que estes materiais apresentam é resultado das transformações martensíticas termoelásticas. São fenômenos independentes do tempo, mas que dependem da temperatura e que demonstram forte reversibilidade, Figura 2.7 (WAYMAN & DUERIG, 1990).

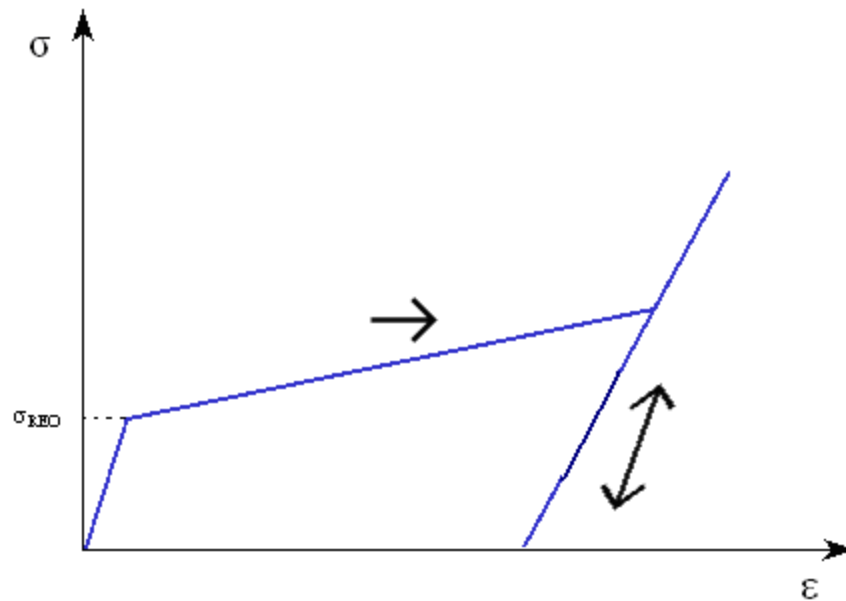


Figura 2.7. Curva tensão deformação quasiplástica esquemática.

A figura 2.8 ilustra o fenômeno de memória de forma simples. Quando a SMA está abaixo de  $M_f$  ela pode ser facilmente deformada (Figura 2.8 A – B – C). Entretanto, quando o material é aquecido acima de  $A_f$ , ocorre uma mudança na estrutura da liga que a faz retornar à sua forma original (Figura 2.8D) e, ao ser resfriada, completa o ciclo, retornando à condição inicial (HODGSON et al, 1990). A base do efeito memória de forma é a transformação de fase martensítica, que explica a recuperação de forma das SMA.

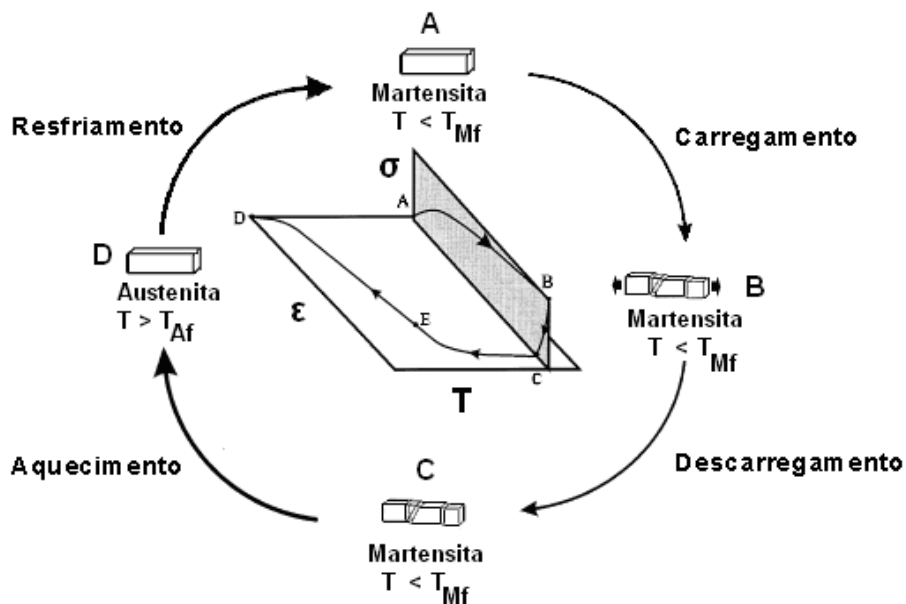


Figura 2.8 - Ilustração do efeito memória de forma.

### **2.3.6 - APLICAÇÕES DIVERSAS DAS SMA**

A *Raychem Corporation* é uma empresa que desenvolve uniões de tubulações hidráulicas utilizando as ligas com memória de forma. Estas uniões têm a forma de casquilhos cilíndricos de diâmetro ligeiramente inferior ao dos tubos que devem unir. Este é expandido à baixa temperatura, enquanto se encontram no estado martensítico, e quando são aquecidos sofrem uma contração que une as extremidades dos tubos (FERNANDES, 2003).

Em 1975, na Universidade de Iowa, foi feito o primeiro implante de um arco ortodôntico explorando a pseudoelasticidade de uma SMA para correção da posição dos dentes (HODGSON et al, 1990). Esta correção é imposta através de uma pequena variação de tensão quase constante que resulta em grande deformação. Tomando como comparativo os arcos convencionais de aço inox, o incômodo é mínimo para o paciente (MACHADO & SAVI 2002).

Outra aplicação das SMA consiste de um filtro de coágulos sanguíneos desenvolvido por Simon. Um fio de NiTi é previamente deformado para assumir uma forma que lhe permita fixar-se às paredes internas das veias. Esse filtro é deformado a baixa temperatura de modo a ser inserido na veia pretendida junto com uma solução salina que o mantém resfriado. Ao ser submetido ao calor do corpo humano, ele retoma a configuração original (MACHADO & SAVI, 2002).

Também na área médica podem-se citar os implantes de placas ósseas no regime pseudoelástico que auxiliam na recuperação de um osso fraturado. Frequentemente estes implantes são usados em fraturas ocorridas na face (nariz, mandíbulas e na região óssea ocular). Essa técnica é conhecida na medicina como síntese óssea (MACHADO & SAVI, 2002). Primeiramente, a placa de NiTi é resfriada abaixo de  $M_f$ , então, implantada no osso. Porém, com o aquecimento natural do corpo humano, a placa se contrai e com isso gera uma compressão nos ossos fraturados, acelerando o processo de cura em relação às placas de titânio ou aço inoxidável. Esta pressão contínua auxilia no processo de cura e reduz o tempo de recuperação (MANTOVANI, 2000).

### **2.3.7 - APLICAÇÕES DE SMA PARA CONTROLE DE VIBRAÇÃO**

O objetivo primário da isolamento de vibração é reduzir forças ou movimentos que são transmitidos de uma estrutura a outra. Tradicionalmente, busca-se atingir este objetivo

através de sistemas de isolamento entre tais estruturas de maneira a reduzir efeitos indesejados ou perturbações na estrutura de interesse, através da isolamento (BAZ et al 1990). Tais sistemas possuem normalmente rigidez relativamente baixa, entretanto, em situações que envolvam grandes cargas, a baixa rigidez gera grandes deslocamentos. Esse problema tem sido contornado pelo uso de dispositivos de rigidez decrescente, ou seja, dispositivos cuja rigidez é inicialmente alta, mas que diminui com o aumento da carga (CLARK et al 1995). Assim, o estado rígido do dispositivo suporta a carga inicial, e a transmissibilidade é reduzida pela rigidez menor na faixa de operação do dispositivo (EATON, 1999).

### **2.3.7.1 - CONTROLE ATIVO DE VIBRAÇÕES VIA SMA**

As propostas de emprego das SMA para o controle ativo de vibrações exploram o efeito memória de forma. Nestes casos, busca-se desenvolver sistemas de controle de vibração baseados na capacidade das SMA de recuperar uma forma previamente definida quando ativadas termicamente.

Baz et al (1990) apresentam uma análise teórico-experimental na qual mostram a possibilidade de se explorar o efeito memória de forma para o controle de vibrações de vigas engastadas. Nessa análise foi verificada a performance do sistema de controle sob diferentes condições de operação, submetida a um degrau de deslocamento. Os resultados obtidos demonstram a potencialidade das SMA para produzir amortecimento de vibração em sistemas flexíveis.

Gotthard and Bidaux (1998) exploraram o emprego de atuadores com memória de forma (NiTi) para o controle de vibração de placas compósitas. Estes autores analisaram os efeitos da interação entre os atuadores de NiTi e a matriz no comportamento do atuador, e a possibilidade de emprego de fios de NiTi embebidos para o controle da placa compósita. A análise permitiu concluir que fios de NiTi podem ser empregados para o controle do comportamento vibratório de vigas compósitas. Isso foi constatado usando fibras de SMA para modificar ativamente as frequências de vibração de um viga polimérica. Outros trabalhos desenvolvidos nesta mesma linha de pesquisa são apresentados por Willians et. al (2000), Kuang and Cantwell (2003), Roh et al (2005), Balapgol et al (2006) entre outros.

### 2.3.7.2 - CONTROLE PASSIVO DE VIBRAÇÕES VIA SMA

O desenvolvimento de sistemas de controle passivo de vibração via SMA explora basicamente o comportamento pseudoelástico das mesmas. Acima de  $A_f$ , as SMA se encontram na fase austenítica, em que se comportam pseudoelasticamente, podendo desenvolver deformações recuperáveis da ordem de 10% para alguns materiais, em contraste à relativamente insignificante deformação recuperável da grande maioria dos materiais metálicos que se restringem ao regime elástico.

Em seguida são apresentados alguns exemplos de emprego das SMA para o controle passivo de vibração.

Birman (1997) analisou a influência de amortecedores pseudoelásticos de NiTi no comportamento vibratório de estruturas elásticas. Na sua análise considerou que os elementos com memória de forma não afetavam o movimento da estrutura, mas agiam somente como dissipadores de energia. Os resultados desse trabalho mostram que os fios de SMA na fase austenítica são muito atrativos para aumentar o amortecimento estrutural. Nesse estudo, foi possível ainda identificar duas limitações das SMA para este tipo de aplicação. A primeira está relacionada à deformação relativamente alta que é necessária para induzir a transformação de fase induzida por tensão. A segunda é a degradação das propriedades termomecânicas da liga quando submetida a carregamentos cíclicos.

Outro trabalho interessante que foca a aplicação de SMA para o controle passivo de vibração foi apresentado por Clark et al (1995). Estes autores propuseram um dispositivo de amortecimento passivo baseado no comportamento pseudoelástico de fios de NiTi. O desempenho e o comportamento deste dispositivo foram avaliados através de uma série de experimentos sob diferentes níveis de amplitudes de deformação, temperaturas ambiente e frequências de carregamento. Os resultados mostram que os amortecedores baseados em NiTi apresentam uma histerese estável para pequenas variações da frequência de carregamento e configuração do dispositivo com um único fio ou com múltiplas camadas. Concluiu que é possível empregar o NiTi para o projeto de dispositivos passivos de amortecimento.

Na mesma linha Eaton (1999) demonstrou o benefício de se empregar elementos pseudoelásticos de NiTi para desenvolver um dispositivo passivo absorvedor de energia. Seu estudo mostrou que um amortecedor pseudoelástico de NiTi pode ser usado com sucesso para suprimir a resposta dinâmica de um sistema secundário, e que para grandes

deformações, o amortecedor de NiTi pode dissipar mais energia que um amortecedor viscoso. A redução da vibração do sistema secundário pode ser atribuída a dois mecanismos: o deslocamento do sistema secundário da frequência de ressonância e à dissipação de energia pela histerese pseudoelástica.

Numa outra linha de pesquisa, que busca explorar as propriedades pseudoelásticas para o controle de vibração em estrutura, (THOMSON et al 1996) analisaram teórica e experimentalmente a resposta dinâmica de uma estrutura espacial treliçada flexível com fios de NiTi. Estes autores concluíram que em algumas situações os fios de SMA podem contribuir fortemente para o amortecimento da estrutura.

A Figura 2.9 ilustra esquematicamente o princípio de um absorvedor de vibração pseudoelástico genérico. O sistema é constituído de uma base vibratória com deslocamento prescrito  $y(t)$ , um elemento com memória de forma de comprimento  $L$ , módulo elástico  $E$  e seção transversal  $A$ . Sobre o elemento tem-se uma massa  $M$  apoiada com deslocamento  $x(t)$ . (LAGOUDAS, 1991) propõe um modelo simplificado e simula o comportamento dinâmico desse sistema.

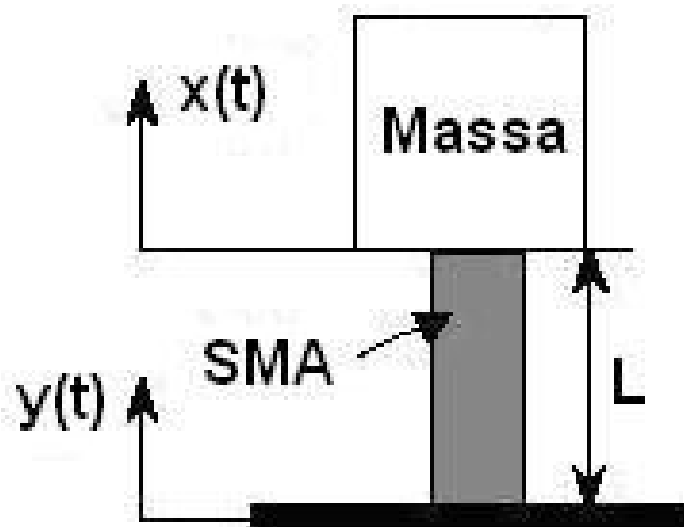


Figura 2.9 - Isolador de vibração pseudoelástico com um grau de liberdade – Esquemático.

### 2.3.7.3 - CONTROLE ADAPTATIVO DE VIBRAÇÕES VIA SMA

Além das aplicações que buscam explorar as SMA como atuadores têm-se ainda uma linha de pesquisa muito promissora que busca explorar exclusivamente a variação de elasticidade das SMA quando do aquecimento. O objetivo é desenvolver elementos de máquinas com rigidez variável. O módulo de elasticidade das SMA na fase austenítica é tipicamente três vezes maior do que o da fase martensítica, sendo, portanto, possível

controlar a rigidez da estrutura como um todo através do controle da rigidez do elemento de máquina baseado em SMA.

Um das principais aplicações potenciais desta categoria é o desenvolvimento de mancais com rigidez variável para controle de vibração em máquinas rotativas. (WILLIAMS et al. 2002) analisaram o comportamento dinâmico de um eixo suportado por mancais com memória de forma. Seus experimentos mostram que as SMA podem ser efetivas para se interferir na frequência natural da máquina afastando-a da frequência de excitação e evitando-se assim a ressonância. Similarmente ao trabalho de (WILLIAMS et al. 2002), He et al (2006) analisaram o comportamento dinâmico de um eixo.

Na mesma linha, He et al (2006) propuseram o emprego de molas com memória de forma incorporadas a mancais para o controle ativo de vibração em máquinas rotativas. Em cada mola tem-se uma barra na qual circula corrente elétrica responsável pelo aquecimento das molas de SMA.

#### **2.3.7.4 - CONTROLE HÍBRIDO DE VIBRAÇÕES VIA SMA (ATIVO/PASSIVO)**

Considera-se como controle híbrido aqueles que se baseiam no efeito memória de forma e na pseudoelasticidade simultaneamente, usando SMA em conjunto com métodos convencionais. O melhor exemplo deste tipo de aplicação é o trabalho desenvolvido por Shahin et al (1997), que analisaram a aplicação de tendões com memória de forma para controle de vibração de um modelo de prédio, explorando tanto o efeito memória de forma (controle ativo) quanto à pseudoelasticidade (controle passivo). O controle ativo baseia-se na transformação de fase induzida por temperatura, ou seja, no efeito memória de forma. No caso ativo, fios com memória de forma são aquecidos por corrente elétrica se opondo ao deslocamento da estrutura. Portanto, os tendões com memória de forma agem como atuadores. No caso passivo, os tendões se deformam pseudoelasticamente em função do carregamento causado pelo deslocamento relativo da estrutura. Tanto no caso passivo quanto no caso ativo as simulações mostraram uma redução significativa da vibração, e em regime estacionário a redução do deslocamento da estrutura em relação ao deslocamento da base é de doze vezes para o caso passivo e sete para o ativo.

Regelbrugge et al (1996) propuseram e analisaram o comportamento de um dispositivo de amortecimento passivo que se adapta com a carga aplicada. Os resultados mostraram a eficiência de materiais adaptativos para mitigar perturbações vibratórias em certas aplicações espaciais.



O comportamento termomecânico diferenciado das ligas com memória de forma tem motivado o seu emprego no controle de vibração também em estruturas civis. Os resultados apresentados na literatura mostram que as SMA apresentam grande potencial de aplicação no controle de vibração de estruturas por meio de mecanismo de isolamento e absorção de energia.

Aiken and Kelly (1990) analisaram um mecanismo de amortecimento de vibração em estruturas que se mostrou capaz de aumentar o amortecimento estrutural de 0,5 para 3%, e reduzir todos os deslocamentos estruturais. Inaudi e Kelly (1994) analisaram experimentalmente atenuadores de massa sintonizados (TMD – *Tuned Mass Dampers*) baseado em fricção, em materiais viscoelásticos e em materiais com memória de forma; aqueles baseados em ligas com memória de forma se mostraram bastante efetivos como mecanismo de amortecimento.

Krumme et al (1995) apresentam um trabalho extensivo sobre a aplicação de ligas com memória de forma (NiTi) como dispositivos amortecedores para o controle passivo de vibração em estruturas civis. Entre outras conclusões obtidas dos experimentos realizados observou-se uma dissipação de energia considerável.

Attanasio et al (1996) desenvolveram um dispositivo dissipador de energia passivo baseado no comportamento termomecânico das SMA. O sistema consistia de uma estrutura, três e suportes verticais e uma viga horizontal de NiTi. O mecanismo de dissipação de energia ocorreu pela transformação de fase induzida por tensão sofrida pela viga de SMA quando submetida a determinados níveis de tensão devido ao deslocamento da estrutura. As principais vantagens deste sistema apontadas pelos autores são a grande capacidade de deformação e a recuperação da deformação com um ciclo térmico relativamente simples.

Davoodi et al (1997) investigaram a possibilidades do emprego de NiTi para o controle de amplitude e frequência natural de estruturas submetidas a excitações de grande amplitudes. Para isso, projetaram e testaram experimentalmente dois dispositivos baseados em NiTi. Em um deles o elemento de NiTi tinha função estrutural, e no outro a função de absorver energia. Seus resultados mostraram que o NiTi pode ser empregado para deslocar a frequência natural de uma estrutura da sua frequência de excitação, e controlar a amplitude dos deslocamento da estrutura durante a vibração.

Um dispositivo de controle vibracional passivo clássico é conhecido como *Tuned Vibration Absorber* (TVA), e consiste em um segundo oscilador montado no sistema primário, de acordo com a ilustração da Figura 2.10.

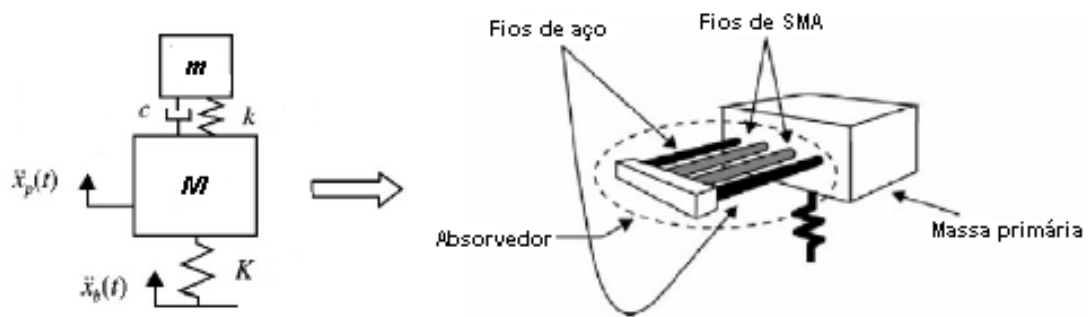


Figura 2.10. Esquema e conceito de projeto do absorvedor TVA (Williams et al. 2002).

O dispositivo TVA adaptativo (ATVA) utiliza as propriedades das SMA. Recomenda-se este tipo de controle em sistemas onde a frequência é variável ou incerta (WILLIAMS et al. 2002). O ATVA com memória de forma possui a capacidade de alterar a sua rigidez de acordo com a temperatura que os elementos se encontram. Esta propriedade faz com que o ATVA com memória de forma possa atenuar as vibrações do sistema primário em uma faixa de frequência apenas alterando-se o módulo de elasticidade, através de aquecimento ou resfriamento, dos elementos elásticos com memória.

## 2.4 - MATERIAIS COMPÓSITOS

Nos últimos anos, houve um grande esforço no sentido de desenvolver materiais com combinações incomuns de propriedades que atendam à demanda das novas tecnologias, como por exemplo, na indústria aeronáutica, de transporte e até mesmo na espacial (CALLISTER, 2000). Essas propriedades não podem ser obtidas por materiais tradicionais como ligas metálicas, materiais cerâmicos e polímeros, atuando isoladamente. Com isso, os engenheiros buscam materiais estruturais que possuam baixa densidade com rigidez, resistência à abrasão e a impactos elevados, além de serem pouco susceptíveis à corrosão. Com os materiais compósitos é possível obter essa combinação de características (CALLISTER, 2000).

Segundo PANZERA (2003), um compósito estrutural pode ser definido como um sistema de materiais composto de duas ou mais fases numa escala macroscópica, cujo desempenho mecânico e propriedades são projetados para serem superiores àqueles dos

constituintes atuando independentemente. Uma das fases é geralmente descontínua, mais forte e resistente, sendo denominada dispersa ou reforçador; enquanto que a fase mais fraca e contínua é denominada matriz.

Pela definição de GIBSON (1994), materiais compósitos são materiais multifásicos formados por dois ou mais materiais distintos combinados em uma unidade estrutural macroscópica produzido artificialmente, obtidos de combinações entre ligas metálicas, cerâmicos e/ou polímeros, visando obter um conjunto de propriedades que nenhum dos materiais convencionais individualmente apresenta, tais como baixa condutividade elétrica, módulo de elasticidade alto, baixa densidade, que pode ser fabricada em diversas cores e formatos, baixo custo de manutenção, alta resistência à corrosão química, fácil instalação e alta resistência mecânica.

Essas fases distintas, na maioria dos compósitos, são compostas por apenas duas delas: a matriz, que é contínua e envolve a outra fase, a dispersa. As propriedades dos compósitos são funções das propriedades das fases que o constituem, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa (CALLISTER, 2000), a qual pode ter a forma de fibras ou particulados, sendo responsável por suportar a carga aplicada. Em função do tipo da fase dispersa, os materiais compósitos podem ser classificados em três categorias. Por sua vez cada categoria apresenta subdivisões, conforme indica a figura 2.11 (DANIEL & ISHAI, 1994).

O compósito de fibras descontínuas contém pequenas fibras (*whiskers*) como reforçadores. O compósito de fibras contínuas são elementos reforçados por longas fibras contínuas sendo os mais eficientes sob o ponto de vista de rigidez e força, pois as fibras podem ser orientadas paralelamente (unidirecional), formando ângulos retos entre si (*crossply*) ou distribuídas em várias direções (multidirecional). Já os compósitos particulados consistem de partículas de vários tamanhos e formas dispersas aleatoriamente dentro de uma matriz (DANIEL & ISHAI, 1994).

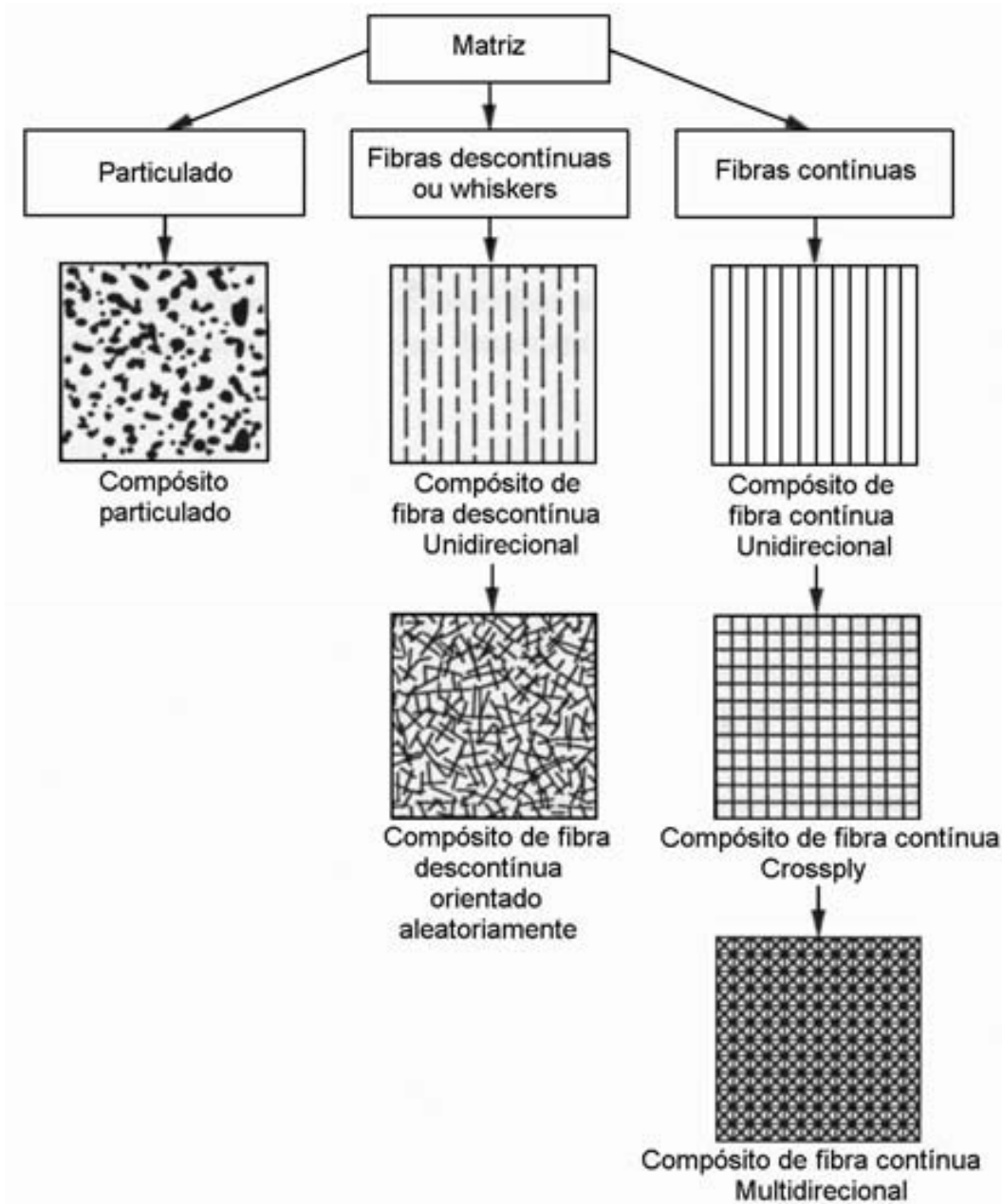


Figura 2. 11. Classificação dos materiais compósitos (Daniel & Ishai, 1994).

Quanto à classificação dos compósitos, a geometria do reforço é um dos principais parâmetros a ser considerado, visto que as propriedades mecânicas do compósito dependem da forma e das dimensões desse componente. Os reforços são usualmente fibrosos ou particulados (GIBSON, 1994).

#### 2.4.1 - FIBRAS

A fibra é o elemento constituído de material filamentar que confere ao material compósito suas características mecânicas: rigidez, resistência à ruptura, etc. (CALLISTER,

2000). As fibras podem ser contínuas ou descontínuas. Como componentes estruturais ambas as formas têm a função de suportar os esforços provenientes da matriz, porém com características distintas que influenciam o desempenho mecânico dos compósitos (MATTHEUS & RAWLINGS, 1994).

As fibras podem ser definidas como unidirecionais quando orientadas segundo uma mesma direção; bidimensionais quando orientadas segundo duas direções ortogonais na forma de tecidos, ou com as fibras orientadas aleatoriamente como esteiras, e tridimensionais, quando as fibras são orientadas no espaço tridimensional, como, por exemplo, os casos dos tecidos multidimensionais (CARLSSON & PIPES 1987). As principais fibras mais utilizadas são as de vidro, carbono e aramida, além de fibras produzidas a partir de polímeros sintéticos (DANIEL & ISHAI, 1994).

#### **2.4.2 - MATRIZES**

As matrizes têm como função principal manter a integridade estrutural do compósito através de ligação simultânea com as fibras em virtude de suas características coesivas e adesivas (MENDONÇA, 2005). Além disso, têm a função de transferir o carregamento para as fibras e também protegê-las contra danos ambientais e manuseios. As matrizes podem ser resinosas (Polyester, Epóxi), minerais (Carbono) ou metálicas (ligas de Alumínio). A escolha do material da matriz dependerá das propriedades físicas, mecânicas e térmicas exigidas, como também do processo de fabricação escolhido e do custo associado. Os polímeros utilizados como matrizes são comumente chamados de resinas (GIBSON, 1994).

Hoje existe uma grande variedade de matrizes disponíveis para a fabricação de compósitos. As matrizes poliméricas podem ser originadas a partir de resinas termorígidas e termoplásticas. No âmbito dos reforços estruturais, as resinas termorígidas representam a matriz ideal para a confecção dos compósitos reforçados com fibras, porque proporcionam, dentre outras propriedades, boa estabilidade térmica, boa resistência química e baixa fluência (MENDONÇA, 2005).

Segundo CALLISTER (2000), é essencial que as forças adesivas da interface fibra/matriz sejam fortes. De fato, a resistência à adesão é uma importante consideração na escolha da combinação fibra-matriz, e a resistência à ruptura do compósito dependerá diretamente da magnitude dessa adesão.

Um ambiente químico agressivo, a umidade do ambiente ou a exposição a outras condições adversas podem diminuir bastante o desempenho da matriz antes de danificar as fibras (MATTHEUS & RAWLINGS, 1994).

### 2.4.3 - APLICAÇÕES DE MATERIAIS COMPÓSITOS

O baixo peso, a alta resistência mecânica e a flexibilidade dos compósitos contribuem decisivamente para a alta eficiência das pás de moinhos usados em conversores de energia eólica, mostrado na Figura 2.12. O vento é uma fonte não-poluidora e renovável para a produção de energia elétrica e os compósitos podem ser moldados aerodinamicamente para tirar vantagem do potencial que o vento oferece (MATTHEUS & RAWLINGS, 1994).



Figura 2.12 - Pás de moinho com material compósito (MATTHEUS & RAWLINGS, 1994).

Outro exemplo inovador do uso de compósito foi o projeto de uma ponte que deixou mais seguro e mais fácil atravessar uma das mais movimentadas linhas de trem da Dinamarca. Esta estrutura foi vencedora do prêmio "Aplicação do Ano" dado pela Associação de Plásticos Reforçados da Alemanha, no ano de 1997. Sua estrutura é feita de

material compósito reforçado com fibra de vidro, a exceção dos componentes como parafusos e as braçadeiras. A ponte foi projetada pela companhia de engenharia dinamarquesa *Rambol*, e está mostrada na Figura 2.13 (MENDONÇA, 2005).



Figura 2.13 - Ponte de compósito (MENDONÇA, 2005).

## 2.5 - COMPOSITOS HÍBRIDOS COM MEMÓRIA DE FORMA (SMAHC)

O conceito de compósito híbrido foi proposto primeiramente no ano de 1988, em uma combinação de material compósito e SMA (ROGERS, 1988). Nesse contexto, as SMA têm duas aplicações potenciais e promissoras: controle de forma e de vibração (Zak et al 2005). As estruturas compósitas híbridas de ligas com memória de forma passaram a ser conhecidas na literatura como SMAHC - *Shape Memory Alloy Hybrid Composites* e atraíram grande atenção nos últimos anos (MATTHEUS & RAWLINGS, 1994). Os SMAHC são fabricados embebidos os elementos de SMA nas matrizes compósitas. Como mostra a Figura 2.14, esses fios podem ser pré-deformados, para controle de forma, ou sem deformação, para controle de rigidez na matriz compósita (OTSUKA E WAYMAN, 1998).

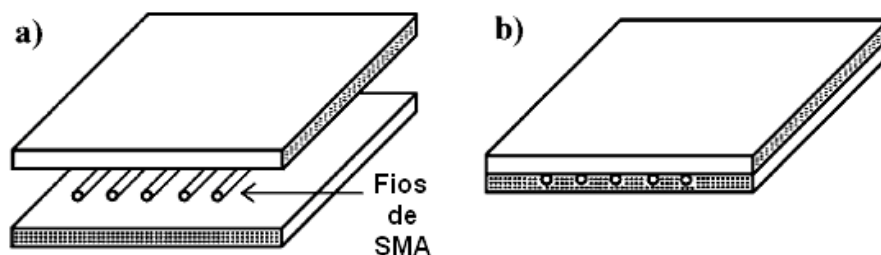


Figura 2.14 – Placa de compósito com fios de SMA embebidos.

Existem poucos relatos sobre o uso deste tipo de compósito, entretanto muitas pesquisas já se encontram em fase de protótipos. A limitação do uso desses materiais SMAHC está no fato de seu comportamento cíclico térmico não ser bem conhecido (ZHENG et. al, 2005). Porém, as potenciais aplicações desses materiais SMAHC têm despertado interesse especial devido às grandes possibilidades de aplicação.

### **2.5.1 APLICAÇÕES DOS MATERIAIS SMAHC**

Os materiais SMAHC podem ser utilizados para controle de forma com elementos de SMA pré-deformados e montados fora da linha neutra. Neste caso, quando acionados, os elementos de SMA tendem a recuperar a forma e conseqüentemente deformam a estrutura. Portanto, controlando-se o acionamento dos elementos de SMA pode-se controlar a forma da estrutura. Outro emprego das estruturas SMAHC é para o controle de vibração, onde se explora apenas a variação do módulo elástico dos elementos de SMA, através da variação de temperatura.

Um estudo foi realizado por Paine & Rogers (1994) sobre dois métodos de aplicação das SMA em estruturas SMAHC: o primeiro, com os atuadores de SMA embebidos na matriz compósita, e o segundo com os elementos com memória de forma posicionados a certa distância do eixo neutro da estrutura. Turner (2000) apresenta um modelo termomecânico para explorar as respostas dinâmicas e estáticas, confecção e a caracterização de materiais SMAHC.

Williams et al. (2002) apresentam um dispositivo adaptativo com elementos de memória de forma que possui a capacidade de alterar sua rigidez de acordo com a temperatura em que os elementos com memória se encontram na matriz compósita. Esta propriedade faz com que o dispositivo possa atenuar as vibrações através de uma faixa de frequência apenas alterando-se a temperatura dos elementos com memória de forma.

Um exemplo da aplicação das estruturas SMAHC é a introdução de fios de NiTi na produção de compósitos com finalidade de modificar a rigidez ou estado de tensões da estrutura. Possibilitando uma capacidade de amortecimento superior. A Figura 2.15 ilustra o uso de atuadores de SMA em uma base de sustentação de uma ponte. Através da variação de temperatura da estrutura modifica-se a rigidez dos atuadores, conseqüentemente, da estrutura como um todo, proporcionando um maior amortecimento (FERNANDES, 2006).



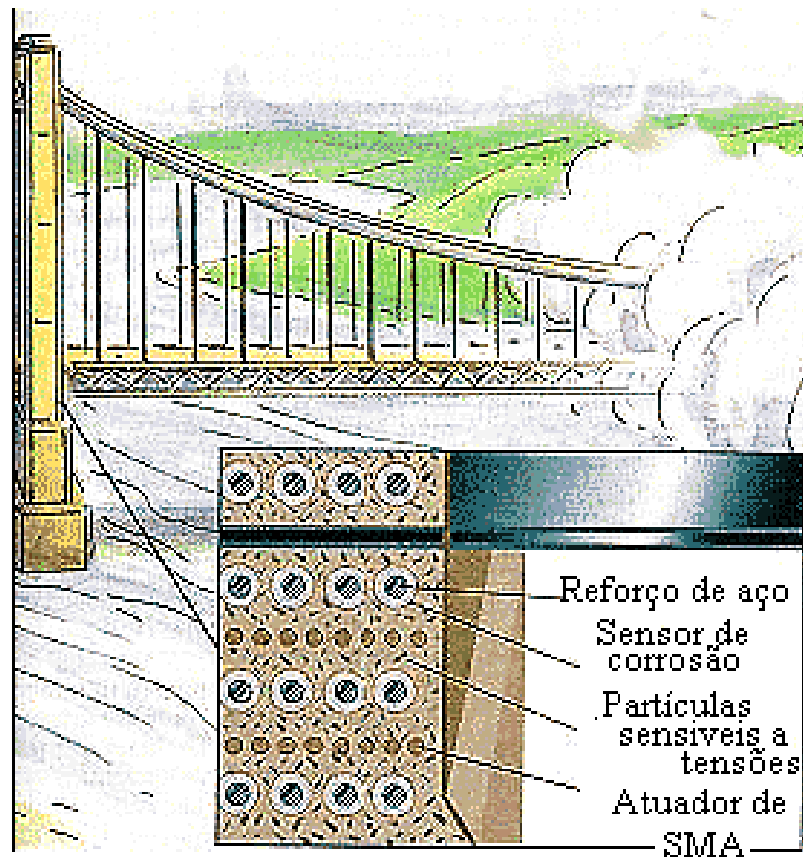


Figura 2.15 - Estrutura de uma ponte com atuadores de SMA (FERNANDES, 2006).

Zak et al (2005) apresentam um estudo numérico sobre dinâmica e controle de um rotor através de um mancal ativo que explora as propriedades dos materiais compósitos híbridos com memória de forma SMAHC, conforme ilustra a Figura 2.16. Em sua análise, consideram um mancal de rolamento montado numa luva compósita híbrida com memória de forma em três diferentes combinações matriz/reforço para o compósito, sendo a matriz polimérica de resina epóxi e os reforços de fibra de vidro e fibra de grafite. Basicamente estes autores desenvolvem uma análise comparativa da amplitude de vibração em função da frequência de excitação do sistema considerando os elementos de NiTi abaixo de  $M_f$  (fase martensita) e acima de  $A_f$  (austenita). Os resultados numéricos mostram que o desempenho dinâmico do rotor pode ser melhorado com o emprego desta tecnologia.

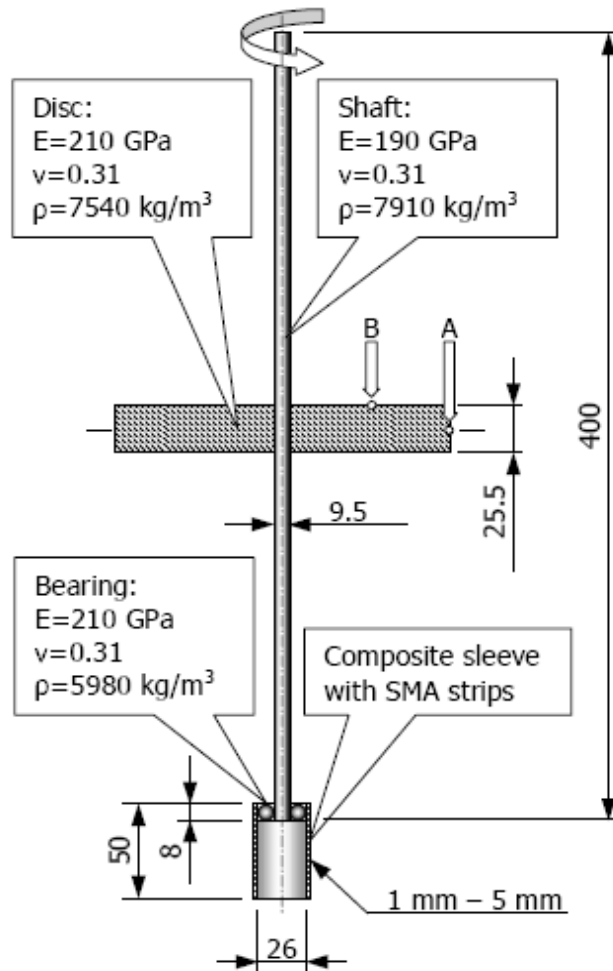


Figura 2.16. Esquema representativo do rotor e do mancal (ZAK et al, 2003).

A SMA pode inteiramente ser ligada à estrutura da matriz ou ser colocada dentro das luvas e unida à estrutura em um número de pontos Turner (2000) No primeiro caso, a ativação do SMA oferece uma distribuição constante do campo de tensão ou sobre o comprimento de cada componente de SMA, enquanto no segundo caso estes campos são restringidos aos pontos muito específicos e previamente escolhidos. Além disso, a aplicação de condições limite adicionais e externas para a SMA permite uma manipulação para compressão ou tração elástica e os campos de tensão, a fim otimizar o processo de controle (BAZ et. al, 1995).

## 2.5.2 - COMPORTAMENTO ELÁSTICO DOS MATERIAIS SMAHC

A análise seguinte considera o comportamento elástico de um compósito híbrido com SMA submetido a uma tensão axial na direção x, conforme o esquema da Figura 2.17. O

compósito tem fibras dispostas longitudinalmente e do mesmo tamanho que a matriz. Além disso, a ligação interfacial, entre as fibras e a matriz, é considerada perfeita, ou seja, as deformações das fibras e da matriz são iguais, numa situação de isodeformação (CALLISTER, 2000). Assim, a carga suportada pelo compósito pode ser expressa como a soma das cargas suportadas pelas fibras ( $F_f$ ) e pela matriz ( $F_m$ ) resultando em:

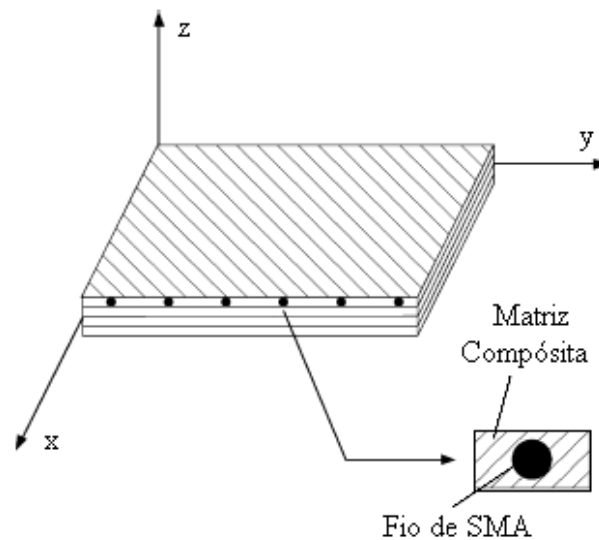


Figura 2.17 - Esquema dos eixos das coordenadas cartesianas na matriz (FARIA, 2007).

$$F_c = F_f + F_m. \quad (2.1)$$

Da definição de tensão,  $\sigma = \frac{F}{A}$ , chega-se a seguinte equação:

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m, \quad (2.2)$$

onde  $\sigma_c, \sigma_f, \sigma_m$  e  $A_c, A_f, A_m$  são, respectivamente, a tensão normal do compósito, da fibra e da matriz e as áreas da seção transversal do compósito, da fibra e da matriz.

Para obter as frações volumétricas das fases fibra ( $V_f$ ) e matriz ( $V_m$ ), como a espessura é constante, dividem-se todos os termos da Equação (2.2) pela área de seção transversal total do compósito  $A_c$ :

$$\sigma_c = \sigma_f \frac{A_f}{A_c} + \sigma_m \frac{A_m}{A_c}, \quad (2.3)$$

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m. \quad (2.4)$$

Da hipótese de isodeformação, tem - se:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m, \quad (2.5)$$

onde  $\varepsilon_c$ ,  $\varepsilon_f$  e  $\varepsilon_m$  são as deformações do compósito, das fibras e da matriz respectivamente. Dividindo cada termo da equação (2.4) pela respectiva deformação e considerando a Lei de Hooke ( $\sigma = \varepsilon E$ ), tem-se:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m, \quad (2.6)$$

onde  $E_c$ ,  $E_f$  e  $E_m$  são, respectivamente, os módulos de elasticidade do compósito, das fibras e da matriz. A Equação (2.6), também conhecida como “Regra das Misturas” (CALLISTER, 2000), representa o módulo de elasticidade do compósito para fibras dispostas e alinhadas longitudinalmente, ou seja, corresponde a média ponderada da fração volumétrica dos módulos de elasticidade das fibras e da matriz.

Da Equação (2.6), pode se obter a relação entre a carga suportada pela fase fibra e a fase matriz (CALLISTER, 2000):

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m}. \quad (2.7)$$

### 2.5.3 - MODELO CONSTITUTIVO PARA SMAHC

Segundo Turner (2000), as teorias constitutivas para materiais SMAHC podem ser desenvolvidas a partir de modelos micro-estruturais de SMA. Entretanto, estes modelos são difíceis de usar na prática, pois têm natureza qualitativa e dependem de determinação de parâmetros e propriedades de materiais impraticáveis (LAGOUDAS, 1991).

A Figura 2.18 representa um elemento de volume laminar de um material tipo SMAHC. A matriz é formada por um material compósito. As direções 1 e 2 das tensões são as principais, nas quais a matriz pode atuar, enquanto que a SMA funciona como atuador apenas na direção 1. Com isso, a formulação apresentada a seguir será referenciada para a direção 1.

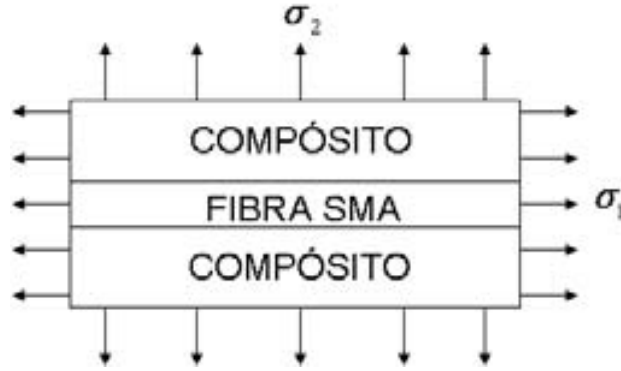


Figura 2.18. Representação de um elemento de volume SMAHC.

Considerando uma tensão uniaxial atuando na fibra de SMA, ao longo da direção 1, um modelo constitutivo termoelástico de SMA como atuador na direção 1 foi proposto por Rogers (1988):

$$\begin{aligned} \sigma_{1a} &= E_a \varepsilon_1 + \sigma_r, & T &\geq A_s \\ \sigma_{1a} &= E_a (\varepsilon_1 - \alpha_{1a} \Delta T), & T &< A_s \end{aligned} \quad (2.8)$$

onde  $E_a$  é o módulo de elasticidade da SMA,  $\varepsilon_1$  é a deformação na direção 1,  $\sigma_r$  é a tensão de recuperação devido à ativação da SMA e  $\alpha_{1a}$  é o coeficiente de expansão térmica (CET) para a SMA inativa. O coeficiente de expansão térmica pode ser considerado constante para temperaturas abaixo de  $A_s$  (TURNER, 2000). A tensão de recuperação e o módulo de elasticidade são funções da temperatura. A tensão de recuperação também é função da deformação inicial.

O modelo axial termoelástico constitutivo para a SMA pode ser escrito em termos do CET, obtendo – se:

$$\sigma_{1a} = E_a \left[ \varepsilon_1 - \int_{T_0}^T \alpha_{1a}(T) dT \right]. \quad (2.9)$$

O modelo da Equação (2.9) é diferenciado de acordo com a aplicação. Assim, uma consideração não-linear do CET  $\alpha_{1a}(T)$  em função da temperatura seria apropriada para recuperações livres ou restritas (TURNER, 2000).

Comparando a Equação (2.9) com a Equação (2.8) tem – se a relação de CET com a temperatura para valores abaixo de  $A_S$  :

$$\int_{T_0}^T \alpha_{1a}(T) dT = \alpha_{1a} \Delta T , \quad (2.10)$$

é relacionada com a tensão de recuperação para temperaturas acima de  $A_S$  de acordo com a equação:

$$\sigma_r = -E_a \int_{T_0}^T \alpha_{1a}(T) dT ,$$

ou

$$\int_{T_0}^T \alpha_{1a}(T) dT = -\frac{\sigma_r}{E_a} . \quad (2.11)$$

Nota-se neste caso que o comportamento termoelástico não-linear da SMA é mantido, pois estimativas da tensão de recuperação são integradas em função da temperatura.

Dessa maneira, a forma geral da relação termoelástica constitutiva na direção 1 para um atuador SMA pré-deformado pode ser obtida por (TURNER, 2000):

$$\sigma_{1a} = E_a \left[ \varepsilon_1 - \int_{T_0}^T \alpha_{1a}(T) dT \right] \quad \text{e} \quad \text{ sinal}(\alpha_{1a}) = \begin{cases} +1 & T < A_S \\ -1 & T \geq A_S \end{cases} , \quad (2.12)$$

onde  $\alpha_{1a}$  é o coeficiente de expansão térmica apenas para  $T < A_S$  e pode ser determinado diretamente pela equação (2.11) quando  $T \geq A_S$ .

Para derivar a relação termoelástica constitutiva para a direção 1 do SMAHC, é assumido que a tensão  $\sigma_1$  atua sozinha no elemento mostrado na Figura 2.18,  $\sigma_2 = 0$ , e que a SMA e a matriz compósita são deformadas na mesma proporção  $\varepsilon_1$ , ou seja, as seções planas permanecem planas. A relação tensão-deformação para a SMA na direção 1 é obtida

pela Eq. (2.12). Similarmente, para a matriz compósita, a relação unidimensional na direção 1 pode ser expressa como:

$$\sigma_{1m} = E_{1m} \left[ \varepsilon_1 - \int_{T_0}^T \alpha_{1m}(T) dT \right]. \quad (2.13)$$

A força resultante na direção 1 ( $\sigma_2 = 0$ ) é distribuída entre a SMA e a matriz e, baseando na Eq. (2.2), é escrita da seguinte forma:

$$\sigma_1 A_1 = \sigma_{1a} A_a + \sigma_{1m} A_m, \quad (2.14)$$

onde  $A_1, A_a, A_m$  e  $\sigma_1, \sigma_{1a}, \sigma_m$  são as áreas da seção transversal e a tensão, respectivamente, do SMAHC, da SMA e da matriz. Assim, a tensão média obtida no elemento é:

$$\sigma_1 = \sigma_{1a} v_a + \sigma_{1m} v_m, \quad (2.15)$$

onde,  $v_a = A_a / A_1$  e  $v_m = A_m / A_1$  são as frações volumétricas de SMA e da matriz, respectivamente. Substituindo  $\sigma_1, \sigma_{1a}$  e  $\sigma_{1m}$  na Eq. (2.15), obtém-se:

$$E_1 \left[ \varepsilon_1 - \int_{T_0}^T \alpha_1(T) dT \right] = E_a v_a \left[ \varepsilon_1 - \int_{T_0}^T \alpha_{1a}(T) dT \right] + E_{1m} v_m \left[ \varepsilon_1 - \int_{T_0}^T \alpha_{1m}(T) dT \right], \quad (2.16)$$

na direção 1. Então, o módulo de elasticidade e o coeficiente de expansão térmica para compósitos híbridos são dadas por:

$$E_1 = E_a v_a + E_{1m} v_m, \quad (2.17)$$

e

$$\int_{T_0}^T \alpha_1(T) dT = \frac{E_a \nu_a \int_{T_0}^T \alpha_{1a}(T) dT + E_{1m} \nu_m \int_{T_0}^T \alpha_{1m}(T) dT}{E_a \nu_a + E_{1m} \nu_m} \quad \text{signal}(\alpha_{1a}) = \begin{cases} +1 & T < A_S \\ -1 & T \geq A_S \end{cases}, \quad (2.18)$$

respectivamente.



### **3 - MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são descritos os processos empregados para a fabricação dos corpos de provas - cp's SMAHC, e a execução dos ensaios de tração. Além disso, são apresentadas as características dos materiais utilizados.

#### **3.1 - FIOS DE SMA – LIGA NiTi**

Os fios de SMA utilizados são de NiTi com 55,50% de Ni e 45,50% de Ti e sua temperatura de formação da fase austenítica  $A_f = 62$  °C, fabricados pela empresa Memory-Metalle GmbH na Alemanha. Possuem secções circulares com diâmetro de 1 mm e sofreram um processo de tratamento térmico através de aquecimento no forno com temperatura controlada, para ativação do fenômeno de memória de forma.

##### **3.1.1 - TRATAMENTO DA LIGA DE SMA**

Ao chegar no laboratório os fios de SMA passaram por um tratamento térmico que consiste de permanência de 20 minutos no forno a 500 °C, seguido de um resfriamento ao ar livre. Visando melhorar a aderência ao epóxi, e de acordo com Amaro (2006), fazer uma decapagem significa remover qualquer camada depositada numa superfície metálica, neste caso em específico, a remoção da camada de oxidação que se forma após o tratamento térmico com solução ácida nas seguintes proporções de ácido fluorídrico e anidro: 3%HF + 15%HNO<sub>3</sub> + 82% H<sub>2</sub>O (em volume.%). O tempo de permanência dos fios nessa solução foi de 40 minutos. Este tempo foi determinado de forma empírica, colocando pequenos pedaços e verificando a intensidade de seu brilho, tomando o cuidado de medir o diâmetro antes e depois do processo de decapagem. Em seguida, usou-se um banho neutralizador, consistindo de enxágüe com água corrente da torneira. E como fim do processo, uma secagem completa dos fios, com ar comprimido.

#### **3.2 - CORPOS DE PROVAS - SMAHC**

Apesar de não haver norma específica para construção dos cp's de compósitos híbridos com SMA, os cp's e os ensaios de tração desenvolvidos neste trabalho estão em parte de acordo com a norma para compósitos fibrosos ASTM D3039 – 76 – *Standart Test*

*Method for Tensile Properties of Oriented Fiber Composites*. As Tabelas 3.1 e 3.2 e a Figura 3.1 mostras as dimensões de referencia da norma ASTM, que os cp's foram baseados para os SMAHC desse trabalho.

Tabela 3.1. Dimensões para cp's em forma de barras (ASTM D3039-76).

Fibras orientadas	Largura recomendada	Comprimento mínimo recomendado
	mm	mm
0° (ângulo)	12,7	127
90° (ângulo)	25,3	38,1
0/90° (ângulo) balanceadas	25,4	127

Tabela 3.2. Espessuras recomendadas para vários tipos de reforços (ASTM D3039-76).

Tipo de reforço	Fibras contínuas	Fibras descontínuas
	mm	mm
Boro	0,508 a 2,53	1,016 a 5,08
Grafite	0,508 a 2,53	1,016 a 5,08
Vidro	0,762 a 3,275	1,523 a 6,55

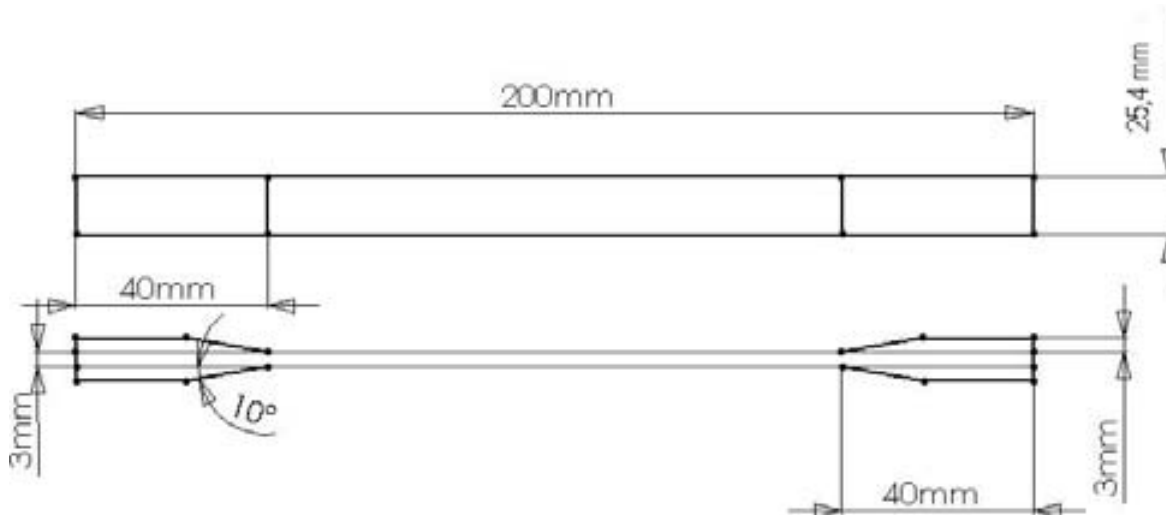


Figura 3.1. Dimensões dos cp's com base na norma ASTM D3039-76.

Os cp's apresentam o comprimento de 200 mm, largura de 25,4 mm e espessura de 3 mm. Na área sobreposta das extremidades de cada um, são coladas peças retangulares de apoio, denominadas *tabs* aplicadas como reforço, feitas do mesmo material dos cp's, com 40 mm de comprimento, 25,4 mm de largura e espessura de 3 mm e colados

simetricamente nas extremidades dos cp's totalizando uma espessura de 9 mm na extremidade dos cp's como mostra a Figura 3.2.

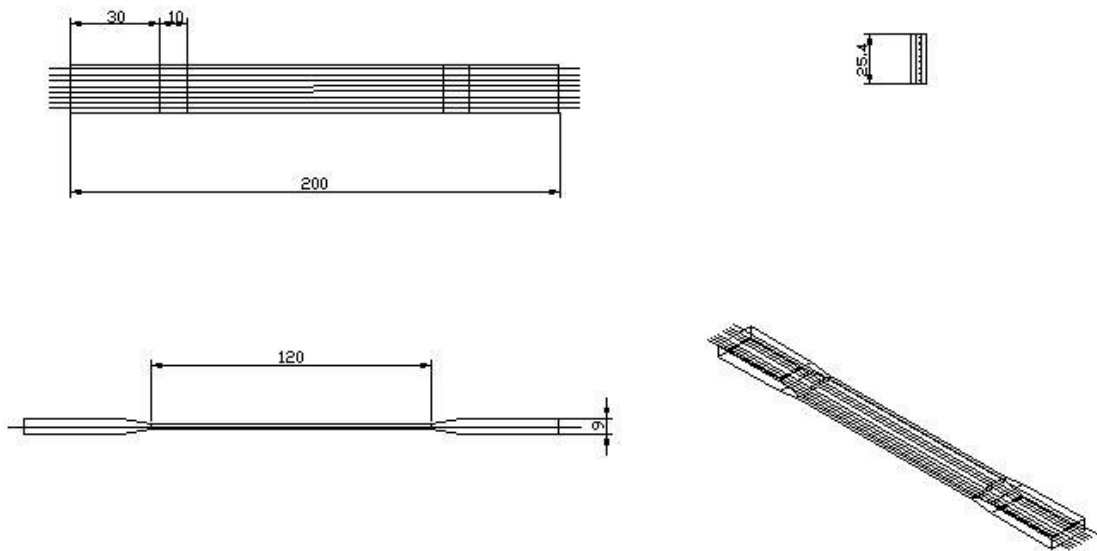


Figura 3.2 – Cp's de SMAHC, dimensões em mm.

A concepção e construção do molde foram definidas de modo a fornecer boa rigidez e fácil manuseio. Previamente, foi estudado um molde modular que oferecesse opções de dimensões de acordo com o tamanho do cp a ser utilizado. Entretanto, devido às limitações nas dimensões dos cp's para compostos fibrosos, essa opção tornou-se inviável, optando-se, portanto, por uma simplificação. A Figura 3.3 apresenta a última versão do molde para o processo de fabricação dos cp's, onde é possível tracionar os fios de SMA e mantê-los na linha neutra.

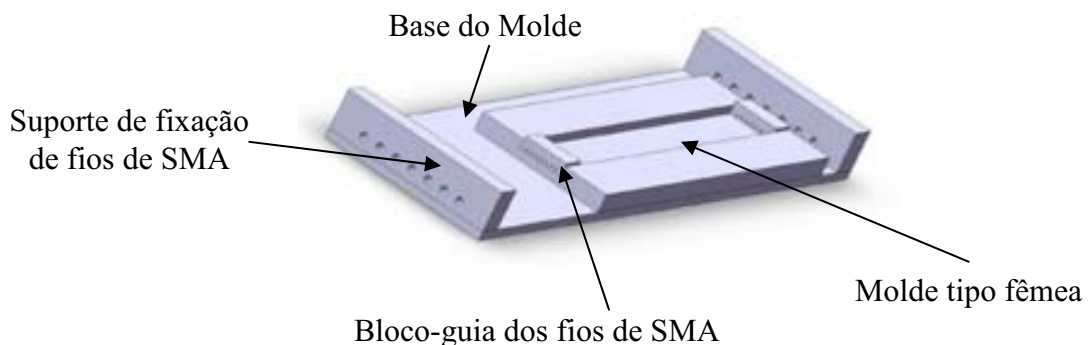


Figura 3.3 – Esquema do molde completo para fabricação de CP de SMAHC.

A base do molde é constituída de aço 1020, a outra parte é formada por uma barra de alumínio, chamada de molde fêmea, com um rasgo no centro de 3 mm de profundidade e 25 mm, de largura, como ilustra a Figura 3.4.

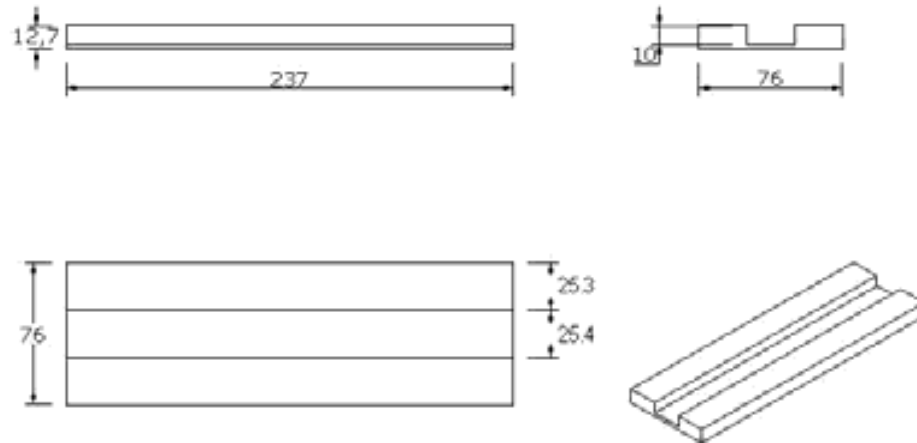


Figura 3.4 – Dimensionamento de molde de CP para caracterização estática de SMAHC, dimensões em mm.

Nas extremidades da base do molde de alumínio têm – se blocos guias com oito ou sete orifícios simetricamente espaçados, que servem para confeccionar cp's de números pares e ímpares de fios de SMA respectivamente, como ilustra a Figura 3.5, 3.6 e 3.7. Esses guias têm como função posicionar corretamente os fios de SMA na linha neutra dos cp's.

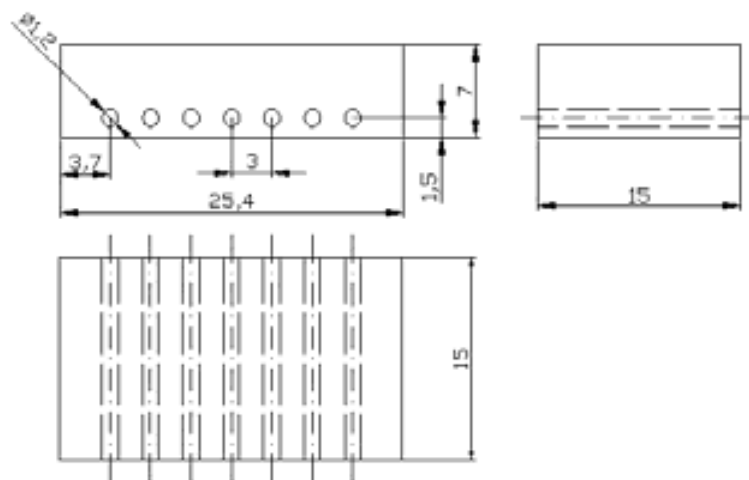


Figura 3.5 – Detalhamento esquemático do bloco-guia de número ímpar de fios de SMA, dimensões em mm.

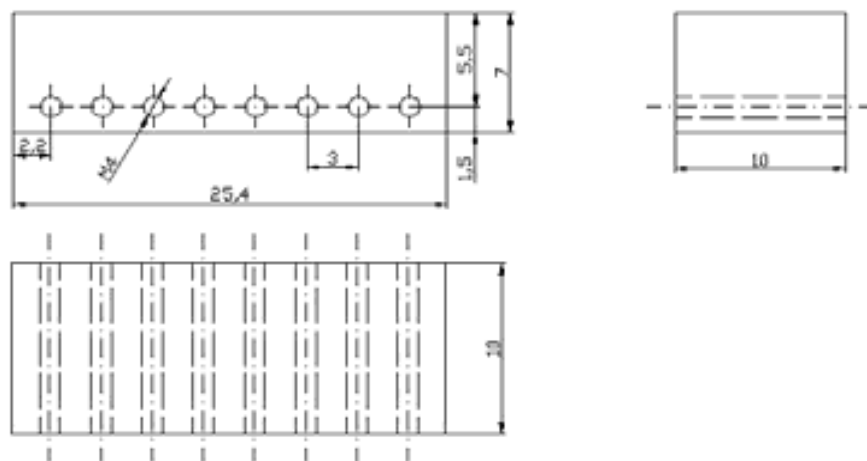


Figura 3.6 – Detalhamento esquemático do bloco-guia de número par de fios de SMA, dimensões em mm.

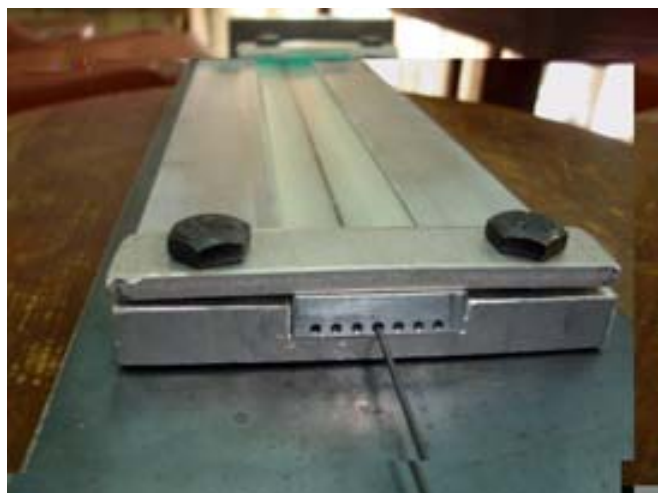


Figura 3.7. Molde preenchido mostrando o bloco guia de alumínio utilizado para o direcionamento dos fios.

Este procedimento de separar os moldes em números pares e ímpares é apenas para manter a simetria entre os fios, o que seria impossível com um único tipo de molde. Para tanto, se deve aplicar um espaçamento diferente para cada tipo de bloco-guia de fios de SMA, melhorando a simetria.

Com a função de evitar que o guia saia de sua posição, instala-se uma trava, que consiste em uma pequena chapa com dimensões de 76 mm por 15 mm de largura com dois orifícios, onde passam dois parafusos para fixação no molde fêmea.

Nas extremidades inferiores do molde, na base de aço 1020, tem – se um o suporte de fixação dos fios de SMA, onde se localizam os parafusos tensores, para obter além de um correto direcionamento, uma boa fixação dos fios de SMA. As Figuras 3.8, 3.9 e 3.10 ilustram detalhadamente o funcionamento desse sistema tensor.



Figura 3.8. Detalhe do parafuso trava utilizado para o correto tensionamento dos fios.

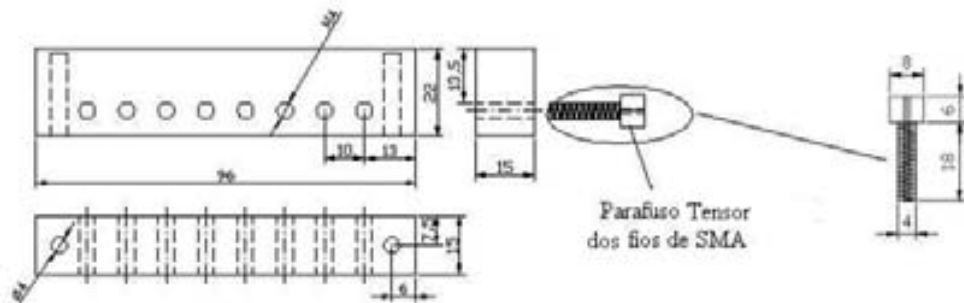


Figura 3.9 – Detalhamento do suporte de fixação e parafuso de estiramento dos fios de SMA, dimensões em mm.

Ao passar por esse parafuso tensor o fio é travado por um parafuso trava, para a correta fixação do fio de SMA com a finalidade de evitar o escorregamento do fio ao ser tensionado pelo parafuso tensor.

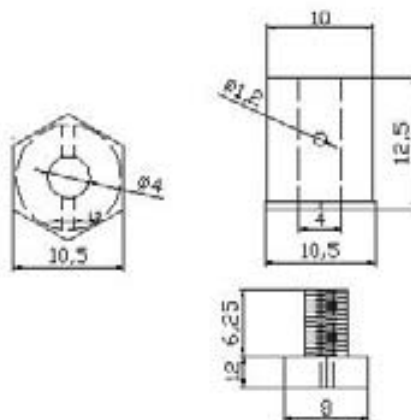


Figura 3.10 - Detalhamento esquemático do parafuso trava de fios de SMA no suporte de fixação, dimensões em mm.

A carga utilizada para o tensionamento dos fios é necessária apenas para garantir a sua retilineidade, sem comprometer a estrutura mecânica dos fios. Além disso, os fios de SMA são de relativa dificuldade no manuseio e essa tensão é necessária para garantir que permaneçam esticados no plano da linha neutra até a cura total da resina.

Os cp's foram fabricados utilizando-se uma resina epóxi da marca Silaex, constituída pelo adesivo SQ 2001 e pelo endurecedor SQ 3131. A justificativa para usar esse sistema a resina da Silaex é por apresentar maior resistência a altas temperaturas, em torno de 65 °C (DE ARAÚJO et al, 2006). Essa característica é importante para a realização dos ensaios de tração à quente. As propriedades da resina Silaex são apresentadas no Anexo 1.

A confecção de cp's inicia-se com a instalação dos fios unidirecionais de SMA, que são presos na extremidade do molde com parafusos de travamento, ajustando a tensão. Conforme a Tabela 3.3, o peso específico da resina é de 1,16 g/cm<sup>3</sup>. Assim, o volume e a massa dos cp's foram medidos usando uma seringa, para obter um volume total de aproximadamente 16 cm<sup>3</sup> ou 16 ml. O volume exato é de 15,240 ml, com proporção de 19% de endurecedor e 81% de adesivo, com tempo de cura de 48 horas à temperatura ambiente de 25 °C e para todos os cp's o tempo de cura foi de 48h..

Tabela 3.3. Propriedades da resina epóxi Silaex.

	Resina SQ 2001	Endurecedor SQ 3131
Viscosidade a 20°C (cPs)	11.000-14.000	3000 +/- 1000
Peso específico 20°C (g/cm <sup>3</sup> )	1,16 +/- 0.01	1.10 +/- 0.05

O adesivo e o endurecedor são misturados por 3 minutos para correta homogeneização. Entretanto, de acordo com o fabricante da resina, o tempo de gel, isto é, o tempo no qual a resina inicia a sua cura é de aproximadamente 15 minutos. Assim, é preciso realizar o preenchimento do molde antes de transcorrer esse tempo. Depois que os fios estão instalados no molde, basta preenchê-lo de resina epóxi de cura a frio e sem bolsa de vácuo. Após o preenchimento com resina aguarda-se pelo menos 48 horas para a cura completa do cp como mostram as Figuras 3.11 e 3.12.



Figura 3.11. Preenchimento do molde com resina epóxi.



Figura 3.12. Moldes montados.



Após a cura é realizado um lixamento no cp para corrigir imperfeições causadas pelo efeito de capilaridade devido à tensão superficial da resina e obter a forma apropriada dos cp's.

Para a fabricação das *tabs* foi utilizado o mesmo molde do cp com o auxílio de um separador entre eles, limitando seu tamanho em 40 mm. O tempo de cura também é de 48 horas. Após serem retirados do molde, então as *tabs* recebem acabamento pelos mesmos motivos dos cp's.

As superfícies dos cp's são lixadas aleatoriamente nas extremidades para aumentar a rugosidade nesta parte do compósito, e promover uma melhor ancoragem mecânica. Em seguida os *tabs* são colados, nos cp's.

Para ter uma boa colagem ao cp's e evitar problemas durante o ensaio utilizou-se da cola *Super Bonder* a base de alpha-cianocrilato, chamadas de colas instantâneas. Apesar de haver pouca mobilidade e ajuste das *tabs* ao cp, após a aplicação da cola instantânea, o resultado se mostrou satisfatório, pois não houve descolamento durante os ensaios. A Figura 3.13 mostra a cura da resina para confecção dos *tabs*.

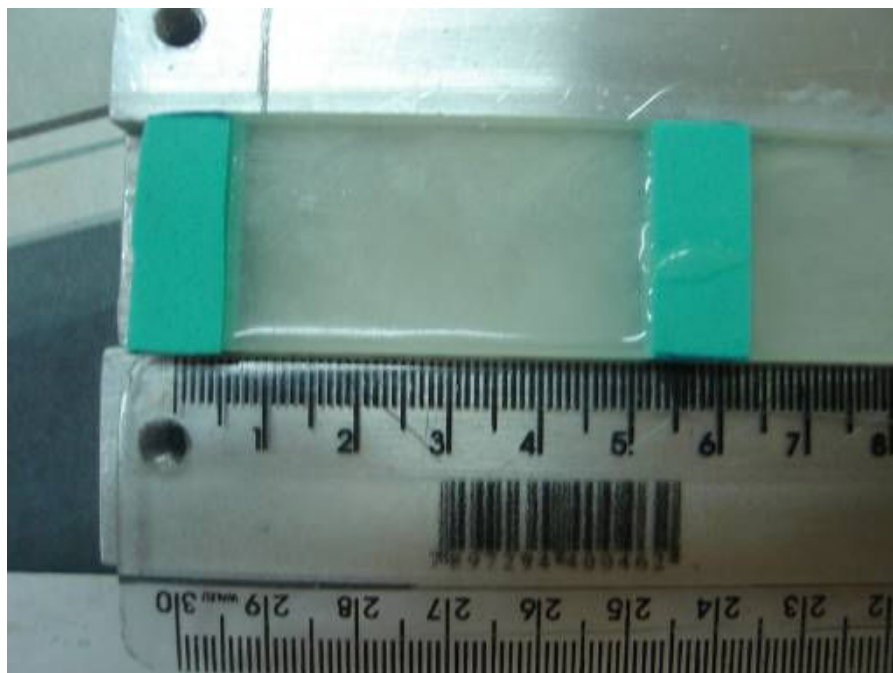


Figura 3.13. Cura da resina para confecção dos *tabs*.

A Figura 3.14 apresenta os cp's já com as *tabs* coladas, e com os fios de SMA isolados, prontos para o ensaio de tração. Para evitar o fechamento de curto circuito elétrico, cada fio dos cp's foi isolado independentemente com fita isolante.



Figura 3.14. Cp's prontos para o ensaio na fase Austenita.

### 3.3 - A MEDIDA DA TEMPERATURA DO FIO DE SMA

Medir a temperatura do fio de SMA é muito importante, pois suas propriedades dependem da temperatura. Por exemplo, as fases do material, martensítica e austenítica, têm relação direta com sua temperatura.

Em decorrência do diâmetro do fio ser pequeno (1,0 mm) há uma grande dificuldade em medir a temperatura do mesmo, pois os termopares são de difícil fixação em dimensões tão pequenas e, após a cura da resina, a medição da temperatura poderia sofrer influência por causa do contato com os fios de NiTi.

A Figura 3.15 mostra como foi montado o aparato para medir a temperatura do fio de SMA. O tempo que a corrente passou pelo fio antes de fazer a medida foi uma média da duração dos ensaios nos cp's de SMAHC, que se aproxima de 4 a 6 minutos, assim foi possível estimar  $M_f$  de 25 °C e  $A_f$  de 75 °C.



Figura 3.15 - Aparato para medir a temperatura do fio de SMA.

Com uma fonte de 12V e 8A e um multímetro com a função de medir temperatura, através de um termopar, foi possível fazer estimar a temperatura do fio de SMA com pequena deformação e com uma margem de tolerância de 3%, como especifica o fabricante do multímetro, e obter - se a temperatura  $A_f$  de 75 °C, após o fio retornar a configuração inicial. Sabe - se que devido ao fato da condutividade térmica da resina ser menor que a do ar, a potencia utilizada para elevar a temperatura do fio a  $A_f$  ao ar livre seria menor no CP SMAHC. Portanto, a potência fornecida pela fonte necessária para atingir  $A_f$  nos fios ao ar livre, é assegurada para os fios embebidos em resina. Testes preliminares com o fio ao ar livre mostraram que a potencia necessária para atingir  $A_f$  é em torno de 96 W.

### 3.4 - ENSAIO DE TRAÇÃO

Os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de à tração utilizando-se uma máquina servo - hidráulica MTS - 810 (Material Test System) com força trativa máxima de 100 kN. De acordo com o fabricante, a máquina possui uma incerteza de cerca de 1%, para cargas acima de 1kN. Os dados experimentais foram coletados com a ajuda do programa *Station Manage*. A Figura 3.17 mostra a máquina MTS e pode-se observar o detalhe da garra de pressão do modelo 647 Hydraulic Wedge Grip. A máquina de tração foi regulada para velocidade de deslocamento axial constante e igual a 1 mm/min. A pressão nas garras foi de 2,5 MPa.

Para realizar o ensaio na fase austenítica ( $T > A_f$ ), o aquecimento do fio de NiTi foi feito por meio do efeito Joule, utilizando uma fonte de tensão de 12V e 8A . Para mais de um fio, é realizada uma ligação em série, o que garante que a mesma intensidade de corrente atravessa todos os fios, Figura 3.16.

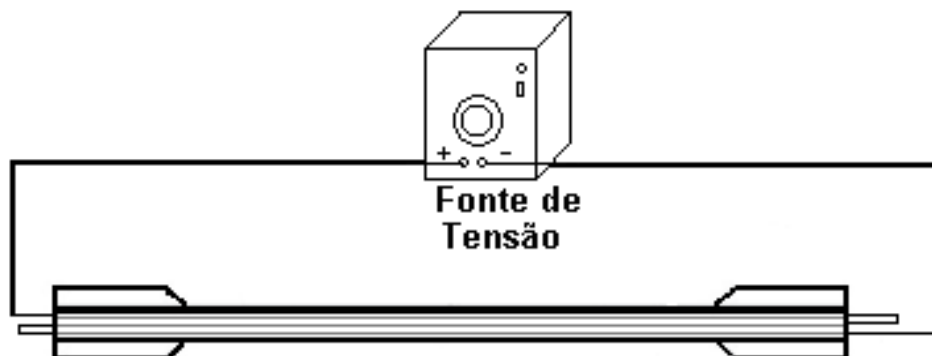


Figura 3.16. Esquema de ligação em série de um CP com três fios de SMA.



Figura 3.17. Máquina hidráulica de tração MTS – 810.

Foram ensaiados cinquenta e dois cp's com frações volumétricas variando de 0 a 6,18%, ou seja, contando de 0 a 6 fios de SMA, divididos em dois grupos com quatro cp's para ensaios a temperatura a  $T > A_f$  e quatro para  $T < M_f$ . No caso da fração volumétrica de 0% de SMA, resumiu-se a apenas um grupo com quatro cp's de resina pura.

## 4 – ANÁLISE TERMOMECAÂNICA DE MATERIAIS SMAHC

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos dos ensaios de tração. Primeiramente é apresentado o comportamento tensão-deformação do fio NiTi empregado para confeccionar os CPSMAHC, e depois o comportamento tensão-deformação dos CPSMAHC's com frações volumétricas variando de 0 à 6,18%. Para ambos os casos os ensaios foram realizados com os fios de SMA na fase completamente martensítica (ensaio a frio –  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C} < M_f$ ) e na fase completamente austenítica (ensaio a quente –  $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C} > A_f$ ). Os ensaios foram realizados a uma taxa de deslocamento de 1,0 mm/min e a pressão de fixação dos cp's foi de 2,5 MPa. Enfatiza – se que a deformação total (ou deformação máxima). Aqui considerada se refere ao valor da deformação no momento da ruptura. Portanto, ela inclui a deformação elástica.

### 4.1 – COMPORTAMENTO TERMOMECAÂNICO DO FIO NiTi

Para levantamento das curvas tensão-deformação dos fio de NiTi foram utilizados corpos de prova com 100 mm de comprimento, presos na máquina com tarugos de dimensões 5 mm por 12 mm e para cada temperatura ( $T < M_f$  e  $T > A_f$ ) foram ensaiados três corpos de prova.

A Figura 4.1 apresenta as curvas tensão–deformação obtidas para  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T < M_f$ ). Para os três corpos de prova observa-se um comportamento inicialmente elástico seguido de uma grande deformação. Tendo em vista que os valores médios é que devem ser considerados para análise, a Figura 4.2 apresenta a curva tensão-deformação média para os três corpos de prova. Observa-se aqui que a tensão de ruptura do fio é de 505,7 MPa, sendo esta também a tensão máxima suportada pelo fio. A deformação máxima é de 39.56 %. A Tabela 4.1 apresenta o módulo de elasticidade tangente no trecho linear para cada um dos fios e o valor médio.

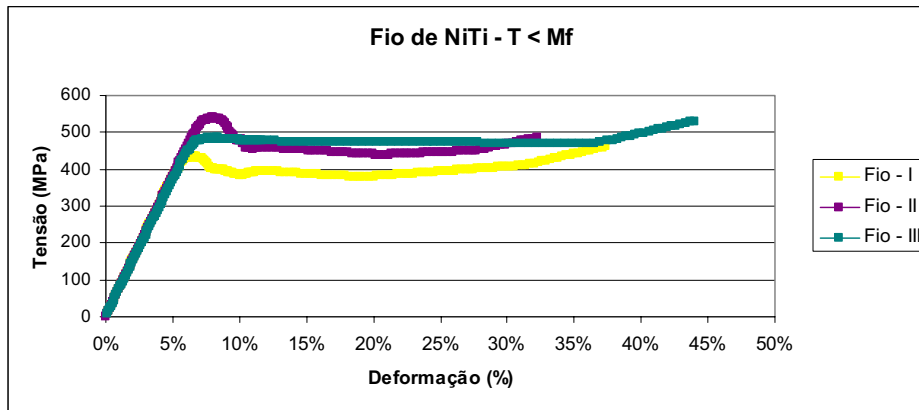


Figura 4.1 - Curvas tensão-deformação para  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C} < M_f$ .

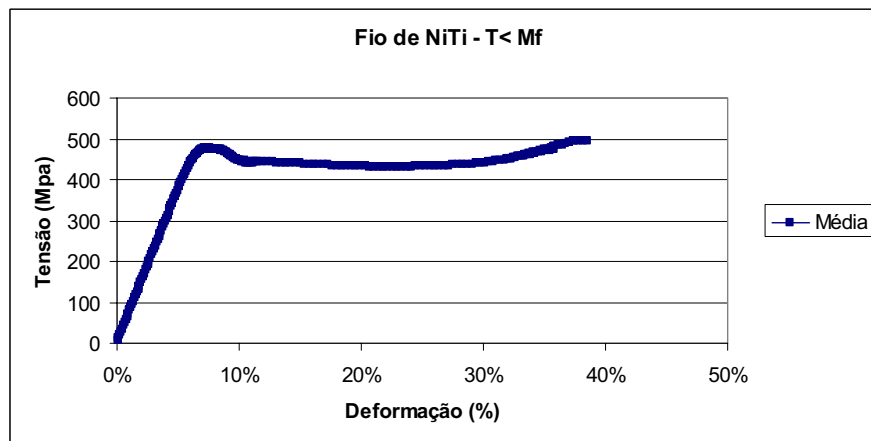


Figura 4.2 – Curva tensão-deformação média -  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C} < M_f$ .

Na fase austenítica os corpos de prova apresentaram o comportamento tensão-deformação mostrado na Figura 4.3, e na Figura 4.4 é apresentada a curva tensão-deformação média dos três corpos de prova. Observa-se aqui que a tensão de ruptura é de 818 MPa e a deformação máxima de 18%

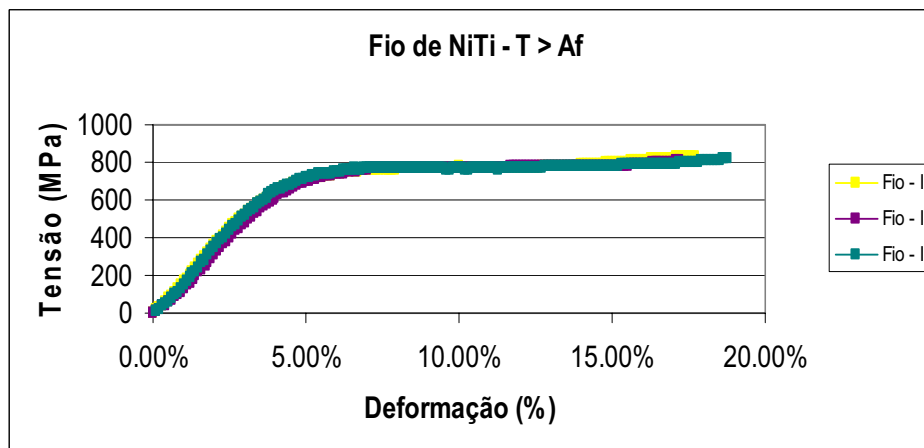


Figura 4.3 - Curvas tensão-deformação para  $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C} > A_f$ .

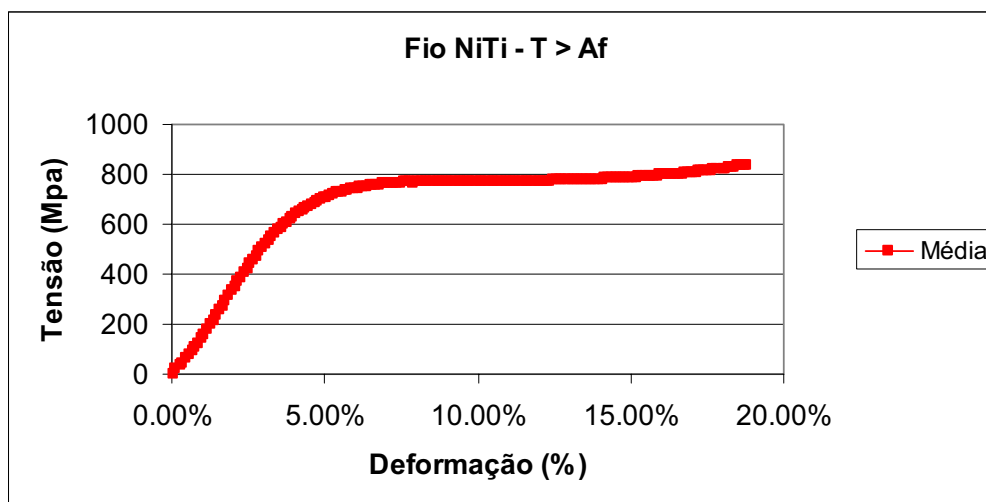


Figura 4.4 – Curva tensão-deformação média -  $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C} > A_f$ .

A Tabela 4.2 apresenta os módulos elásticos tangentes, no trecho linear, obtidos para cada um dos corpos de prova, e o valor médio para cada uma das fases.

Tabela 4.1. Propriedades mecânicas do fio NiTi –  $T = 25^{\circ}\text{C} < M_f$ .

	$\sigma_{rup.}$ (MPa)	%Al. (%)	$E$ (GPa)
CPSMA1F I	462,00	37,40%	8,6
CPSMA1F II	525,00	32,50%	8,2
CPSMA1F II	530,00	45,98%	8,2
Valor médio	$505,67 \pm 0,27$	$38,62\% \pm 1,14\%$	$8,33 \pm 0,12$

Tabela 4.2. Propriedades mecânicas do fio NiTi –  $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C} > A_f$ .

	$\sigma_{rup.}$ (MPa)	%Al. (%)	$E$ (GPa)
CPSMA1Q I	835,00	17,70%	19,0
CPSMA1Q II	807,00	17,21%	16,4
CPSMA1Q III	812,00	18,80%	18,0
Valor médio	$818,00 \pm 0,34$	$17,90\% \pm 1,23\%$	$17,8 \pm 0,11$

A Figura 4.5 apresenta uma comparação entre as curvas tensão-deformação médias obtidas para  $T < M_f$  e  $T > A_f$ . A variação do módulo de elasticidade com o aquecimento é de 113,7%, o que equivale a um aumento de 2,14 vezes, e da deformação máxima é de -45,24%.

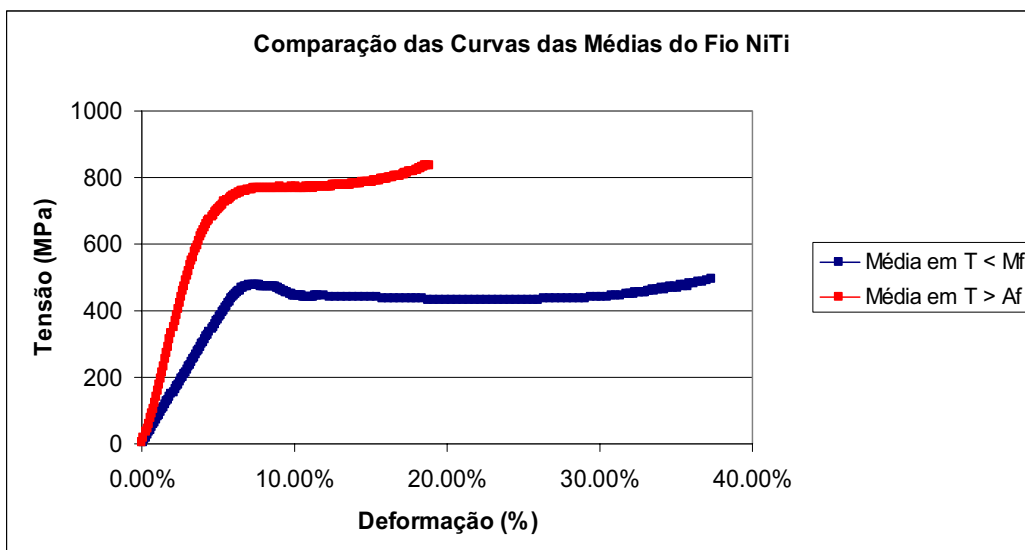


Figura 4.5 – Comparação entre as curvas tensão - deformação médias a  $T < M_f$  e  $T > A_f$ .

## 4.2 – COMPORTAMENTO MECÂNICO DA RESINA

As curvas tensão – deformação da resina obtidas para  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  são apresentadas na Figura 4.6. Para os quatro corpos de prova observa-se um comportamento elástico. A Figura 4.7 apresenta a curva tensão-deformação média para os quatro corpos de prova. Observa-se aqui que a tensão de ruptura é de 28,9 MPa. A deformação máxima é de 0,81 %. A Tabela 4.3 apresenta o módulo de elasticidade tangente para cada um dos cp's, a deformação máxima e o valor médio o módulo de elasticidade teórico, obtido através da equação d, do módulo de elasticidade para compósitos híbridos, equação 2.17. Os corpos de prova de resina foram confeccionados com as dimensões aproximadas da norma ASTM D3039 – 76.

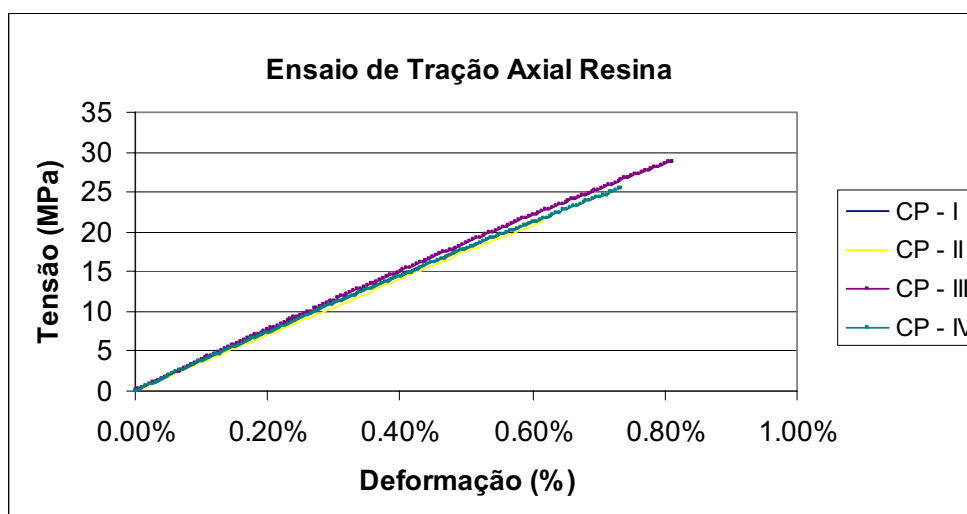


Figura 4.6 Curvas Tensão-Deformação resina.



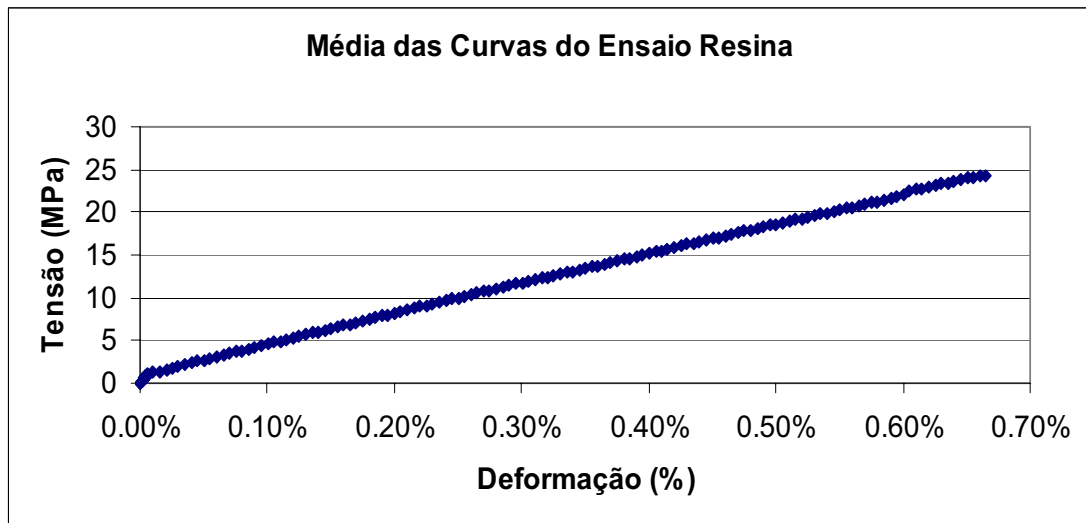


Figura 4.7 Curvas Tensão-Deformação médios resina.

Tabela 4.3. Propriedades Mecânicas da Resina.

	$\sigma_{rup.}$ (MPa)	%Al. (%)	$E_{exp.}$ (GPa)	$E_{teor.}$ (GPa)
CPRESINA I	21,42	0,36	3,77	4,0
CPRESINA II	21,59	0,62	3,70	4,0
CPRESINA III	28,89	0,81	3,80	4,0
CPRESINA IV	25,52	0,73	3,73	4,0
Valor médio	24,36 ± 0,63	0,69 ± 0,42	3,75 ± 0,11	4,0

Destaca-se que houve pequena variação entre os módulos elásticos experimentais dos quatro cp's, e a variação média entre os módulos elástico teórico e experimental é de 0,25 MPa ou 6,25%.

#### 4.3 – COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO SMAHC

Conforme mencionado anteriormente, foram fabricados 52 corpos de prova compósitos híbridos de acordo com a geometria apresentada na Figura 3.1. Foram consideradas as frações volumétricas de SMA são apresentadas na Tabela 4.4. Para cada fração volumétrica foram ensaiados 8 cp's, sendo 4 com os fios de SMA na fase martensítica ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ) e quatro na fase austenítica ( $T = 75^{\circ}\text{C}$ ).

Tabela 4.4. Frações Volumétricas dos cp's (corpos de prova compósitos híbridos).

Configuração	$\xi_{SMA}$
Sem fios	0%
CPSMAHC1	1.03 %
CPSMAHC2	2.06 %
CPSMAHC3	3.09 %
CPSMAHC4	4.12 %
CPSMAHC5	5.15 %
CPSMAHC6	6.18 %

#### 4.3.1 - COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO CPSMAHC1

A Figura 4.8 apresenta a curva tensão-deformação média para os quatro corpos de prova ensaiados a  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A tensão de ruptura do SMAHC1F é de 31,60 MPa, sendo esta também a tensão máxima suportada pelo SMAHC1F. A deformação máxima é de 0,84%.

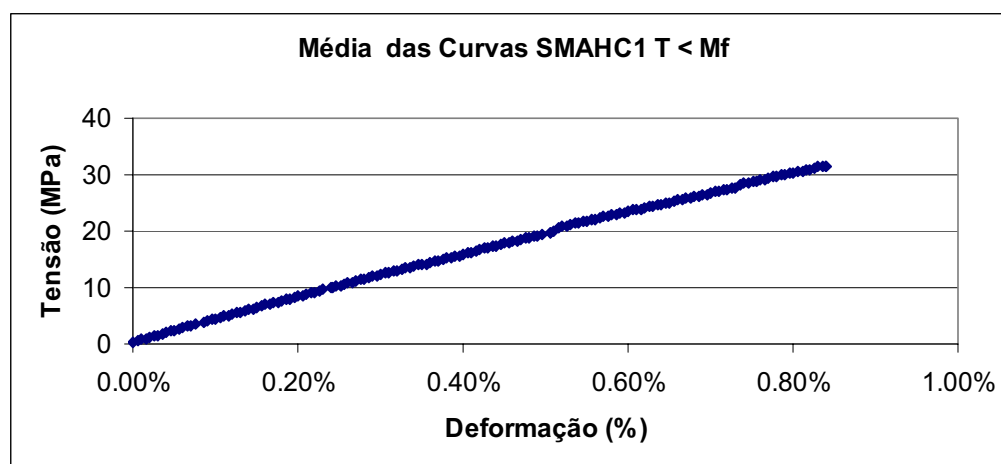


Figura 4.8 - Curvas Tensão-Deformação média do SMAHC1F.

A Figura 4.9 apresenta a média das curvas tensão-deformação dos quatro corpos de prova na fase austenítica. A tensão de ruptura CPSMAHC1Q é de 34,02 MPa e a deformação máxima de 1,43%.

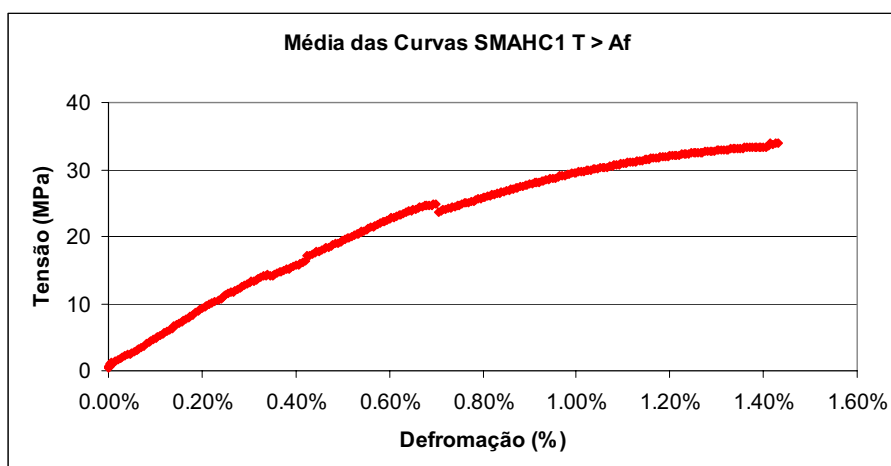


Figura 4.9 - Curvas Tensão-Deformação média do SMAHC1Q.

A diferença entre o módulo elástico experimental e o módulo elástico teórico em média é de 0,83 GPa na fase martensítica, e na fase austenítica, de 0,36 GPa. Porém, a diferença em média entre os módulos elásticos experimental da fase austenítica e da fase martensítica é de - 0,37 o que significa um decréscimo do módulo elástico na mudança de fase. Os valores das médias dos módulos de todos os ensaios estão na Tabela 4.6.

#### 4.3.2 - COMPORTAMENTO TERMOMECAÂNICO DO CPSMAHC2

A tensão de ruptura do SMAHC2F é de 27,33 MPa, sendo esta também a tensão máxima. A deformação máxima é de 0,70%. Tem – se na Figura 4.10 a curva tensão-deformação média para os quatro corpos de prova para  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

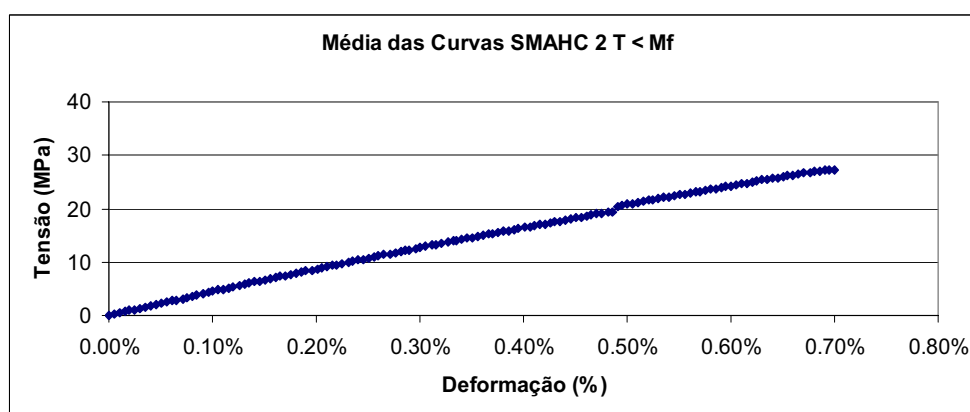


Figura 4.10 - Curvas Tensão-Deformação do SMAHC2F.

A Figura 4.11 apresenta na fase austenítica comportamento da curva tensão-deformação média dos quatro corpos de provas. A tensão de ruptura CPSMAHC2Q é de 27,62 MPa e a deformação máxima de 2,00%.

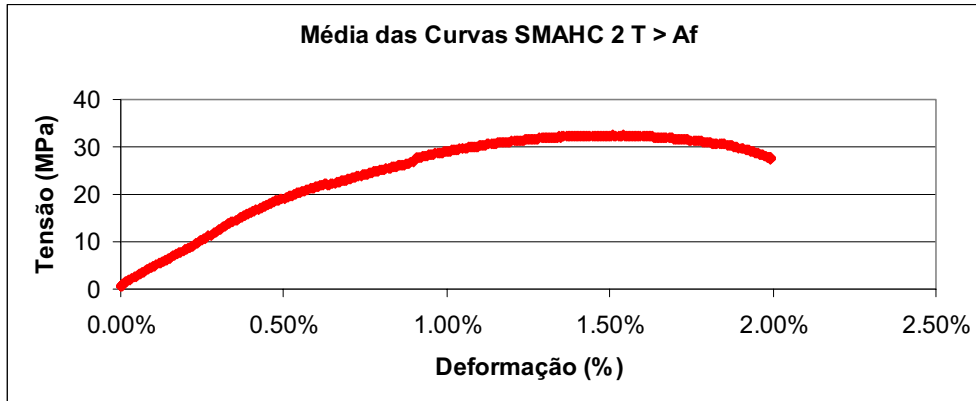


Figura 4.11 - Curvas Tensão-Deformação do SMAHC2Q.

Em termos de média a diferença entre o módulo elástico experimental e o módulo elástico teórico é de 0.71 GPa na fase martensítica - 0.18 GPa, na fase austenítica. A diferença em média entre os módulos elásticos experimental da fase austenítica para a fase martensítica é de - 0.70 GPa.

#### 4.3.3 - COMPORTAMENTO TERMOMECAÂNICO DO CPSMAHC3

A tensão de ruptura do SMAHC3F é de 37,55 MPa, sendo esta também a tensão máxima suportada pelo CPSMAHC3F e deformação máxima é de 0,85 %. Tem – se na Figura 4.12 a curva tensão-deformação média para os quatro corpos de prova obtidas para  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$   $T < M_f$ .

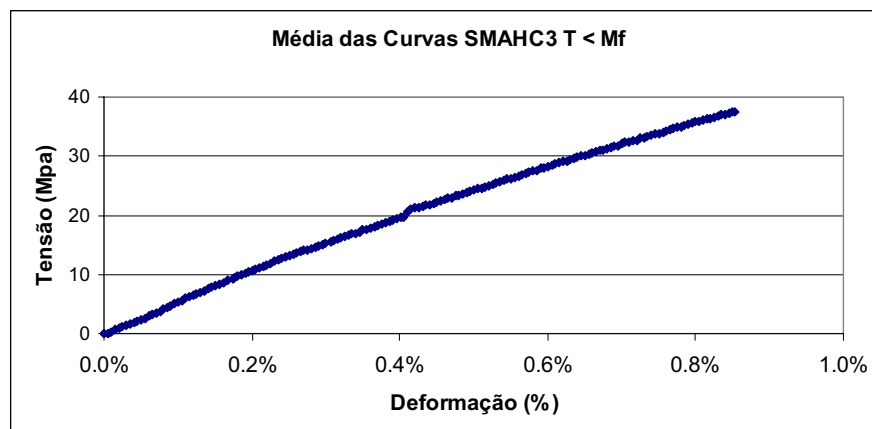


Figura 4.12 - Curvas Tensão-Deformação do CPSMAHC3F.

A Figura 4.13 apresenta na fase austenítica comportamento da média da curva tensão-deformação para os quatro corpos de prova. A tensão de ruptura CPSMAHC3Q é de 37,81 MPa e a deformação máxima de 1,90%.

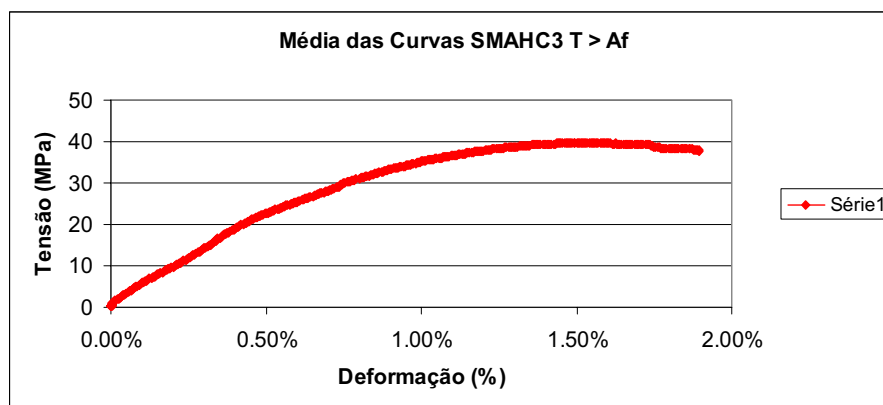


Figura 4.13 - Curvas Tensão-Deformação do CPSMAHC3Q.

A diferença entre o módulo elástico experimental e o módulo elástico teórico em média é de 1,87 GPa na fase martensítica é de 0,67 GPa. A diferença em média entre os módulos elásticos experimental da fase austenítica e da fase martensítica é de - 0.90 GPa.

#### 4.3.4 - COMPORTAMENTO TERMOMECAÂNICO DO CPSMAHC4

A tensão de ruptura do SMAHC4F é de 45,06 MPa, sendo esta também a tensão máxima suportada pelo CPSMAHC4F e deformação máxima é de 1,04 %. Apresenta – se na Figura 4.14 as curvas tensão – deformação média obtidas para  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$   $T < M_f$  para os quatro corpos de prova.

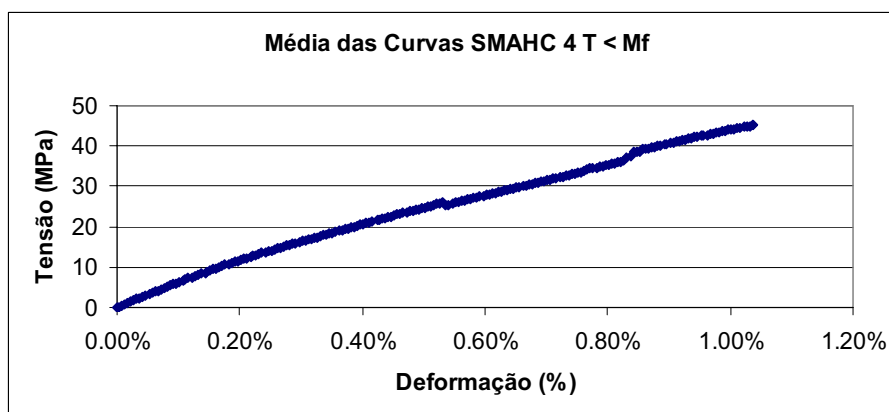


Figura 4.14 - Curvas Tensão-Deformação do CPSMAHC4F.

A Figura 4.15 apresenta na fase austenítica comportamento da curva tensão-deformação média dos quatro corpos. A tensão de ruptura CPSMAHC4Q é de 53,04 MPa e a deformação máxima de 2,60%.

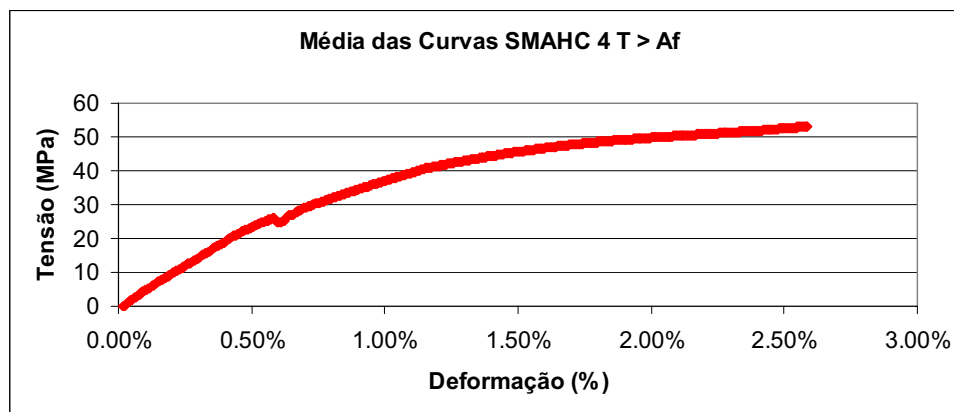


Figura 4.15 - Curvas Tensão-Deformação do CPSMAHC4Q.

A diferença entre os módulos elásticos experimental da fase austenítica para a fase martensítica é de - 0.90 GPa. Na fase martensítica é de 2,19 GPa a diferença do módulo elástico experimental pelo módulo elástico teórico. Na fase austenítica essa diferença é de 0,98 GPa.

#### 4.4.5- COMPORTAMENTO TERMOMECAÂNICO DO CPSMAHC5

Tem – se na Figura 4.16 a curva tensão-deformação média para os quatro corpos de prova obtidas para  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$   $T < M_f$ . A tensão de ruptura do SMAHC5F é de 40,00 MPa, sendo esta também a tensão máxima suportada pelo CPSMAHC5F e o valor da deformação máxima é de 0,71 %.

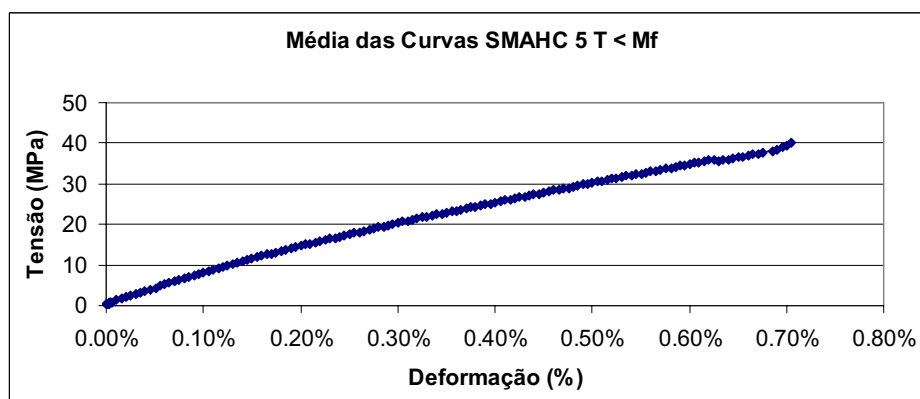


Figura 4.16 - Curvas Tensão-Deformação do CPSMAHC5F.

A Figura 4.17, apresenta na fase austenítica o comportamento da curva tensão-deformação média dos quatro corpos de prova. A tensão de ruptura CPSMAHC5Q é de 30,30 MPa e a deformação máxima de 1,24%.

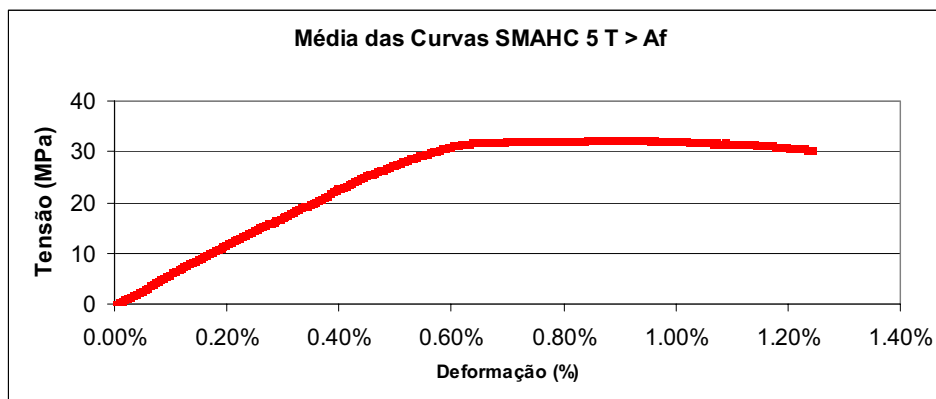


Figura 4.17 - Curvas Tensão-Deformação do CPSMAHC5Q.

A diferença do módulo elástico na fase martensítica é de 3,5 GPa entre o módulo elástico experimental e o módulo elástico teórico. Na fase austenítica essa diferença é de 2,13 GPa. A diferença entre os módulos elásticos experimental da fase austenítica e na fase martensítica é de - 0.88 GPa.

#### 4.4.6 - COMPORTAMENTO TERMOMECAÂNICO DO CPSMAHC6

A tensão de ruptura do SMAHC6F é de 34,46 MPa, sendo esta também a tensão máxima suportada pelo CPSMAHC6F e deformação máxima é de 0,62 %. Apresenta – se na Figura 4.18 as curvas tensão – deformação média obtidas para  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$   $T < M_f$  para os quatro corpos de prova.

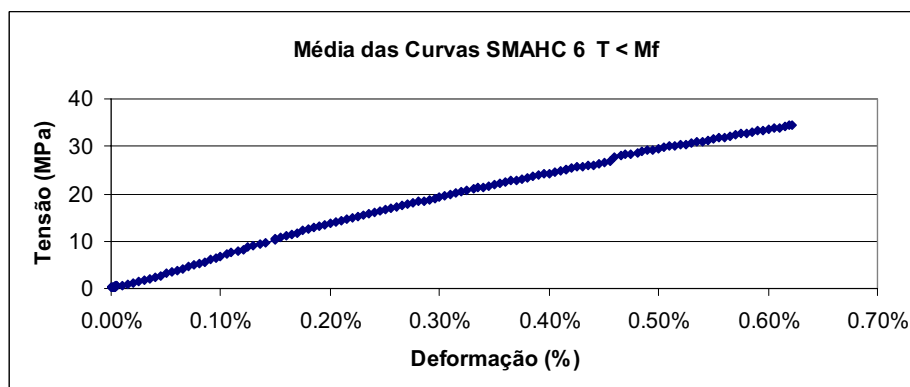


Figura 4.18 - Curvas Tensão-Deformação do CPSMAHC6F.

A Figura 4.19 apresenta na fase austenítica comportamento da curva tensão-deformação média para quatro corpos. A tensão de ruptura CPSMAHC6Q é de 40,14 MPa e a deformação máxima de 3,37%.

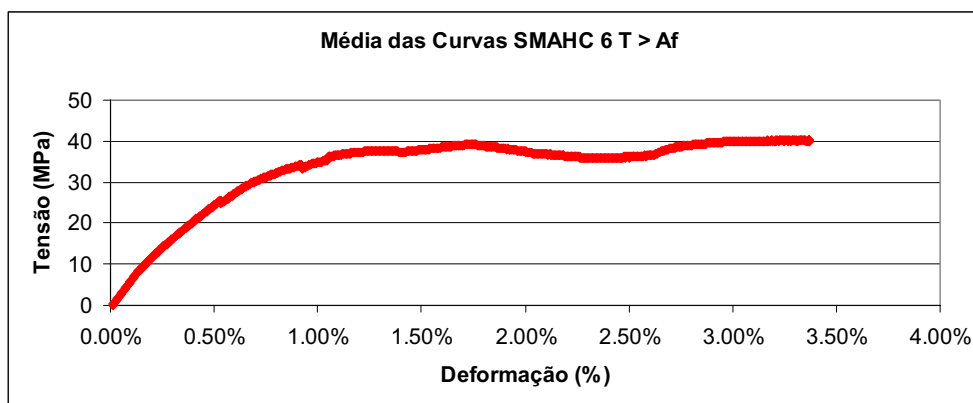


Figura 4.19 - Curvas Tensão-Deformação do CPSMAHC6Q.

Na fase martensítica é de 3,39 GPa entre o módulo elástico experimental, na região linear e o módulo elástico teórico. Na fase austenítica essa diferença é de 1,2 GPa. A diferença entre os módulos elásticos experimental da fase austenítica e da fase martensítica é de  $-1,61$  GPa.

Nas Tabelas 4.5 e 4.6 apresentam os valores médios dos módulos elásticos tangentes obtidos para cada um dos grupos CPSMAHCF e CPSMAHCQ respectivamente, o módulo de elasticidade teórico, obtido através da equação da regra das misturas para materiais compósitos equação (2.17), o valor médio e a deformação máxima.

Tabela 4.5. Propriedades dos CPSMAHCF -  $T = 25$  °C.

	$\sigma_{rup.}$ (MPa)	$\epsilon_{máx.}$ (%)	$E_{exp.}$ (GPa)	$E_{teor.}$ (GPa)
CPSMAHC1F	$31,60 \pm 1,11$	$0,84 \pm 0,11$	$4,87 \pm 1,12$	4,04
CPSMAHC2F	$27,33 \pm 1,21$	$0,70 \pm 0,14$	$4,80 \pm 1,13$	4,09
CPSMAHC3F	$37,55 \pm 2,23$	$0,85 \pm 0,33$	$6,00 \pm 0,99$	4,13
CPSMAHC4F	$45,06 \pm 2,16$	$1,04 \pm 0,24$	$6,37 \pm 0,89$	4,18
CPSMAHC5F	$40,00 \pm 1,35$	$0,71 \pm 0,54$	$7,72 \pm 1,34$	4,22
CPSMAHC6F	$34,46 \pm 3,11$	$0,62 \pm 0,13$	$7,66 \pm 2,15$	4,27



Tabela 4.6. Propriedades dos CPSMAHCQ -  $T = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ .

	$\sigma_{rup.}$ (MPa)	$\varepsilon_{m\acute{a}x.}$ (%)	$E_{exp.}$ (GPa)	$E_{teor.}$ (GPa)
CPSMAHC1Q	$34,02 \pm 1,18$	$1,43 \pm 0,14$	$4,5 \pm 1,56$	4,14
CPSMAHC2Q	$27,62 \pm 1,06$	$2,00 \pm 0,61$	$4,10 \pm 1,04$	4,28
CPSMAHC3Q	$37,81 \pm 2,01$	$1,90 \pm 0,56$	$5,10 \pm 0,81$	4,43
CPSMAHC4Q	$53,04 \pm 2,24$	$2,60 \pm 0,78$	$5,55 \pm 0,36$	4,57
CPSMAHC5Q	$30,30 \pm 2,14$	$1,24 \pm 0,16$	$6,84 \pm 1,35$	4,71
CPSMAHC6Q	$40,14 \pm 1,57$	$3,37 \pm 0,51$	$6,05 \pm 1,68$	4,85

É importante salientar que todos os cp's ensaiados sofreram ruptura na região do *tab*, como mostra a Figura 4.20 e não na região central dos cp's. Isto é um indicativo de que o CP precisa ser redimensionado.

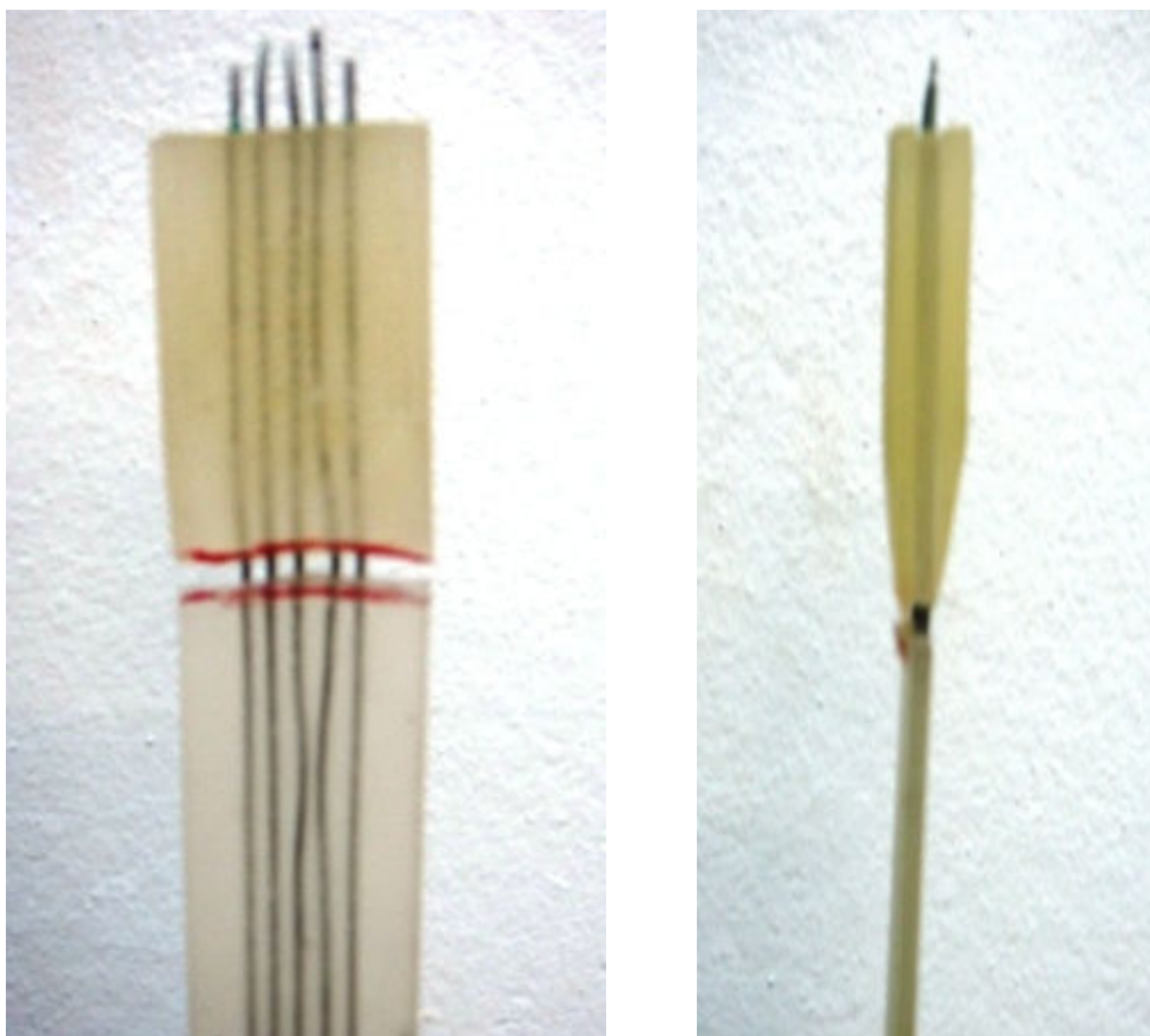


Figura 4.20. Região do rompimento dos *tabs*.

#### 4.5 - ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES TERMOMECÂNICAS

Desenvolve-se nessa seção uma análise comparativa entre as propriedades mecânica medidas nas fases martensítica e austenítica, ou seja, para  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectivamente. A Figura 4.21 mostra a evolução do módulo de elasticidade em função da  $\xi_{SMA}$  na fase martensítica. Observa-se que o módulo cresce com a fração volumétrica de SMA, o que é esperado tendo em vista que de acordo com os resultados da seção 4.1 o módulo da liga de NiTi é maior que o módulo da resina.

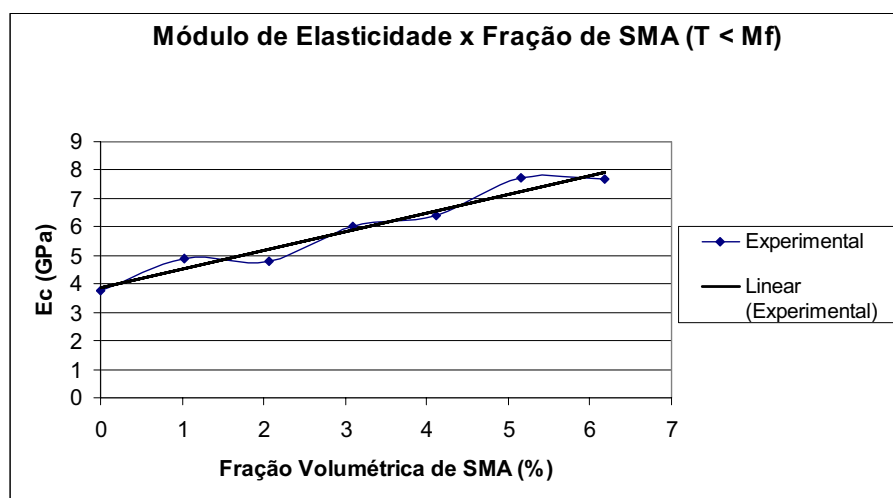


Figura 4.21 - Evolução do  $E_c$  em função da  $\xi_{SMA} - T = 25^{\circ}\text{C}$ .

Na Figura 4.22, tem-se a evolução do módulo de elasticidade em função de  $\xi_{SMA}$ , em  $T = 75^{\circ}\text{C}$ .

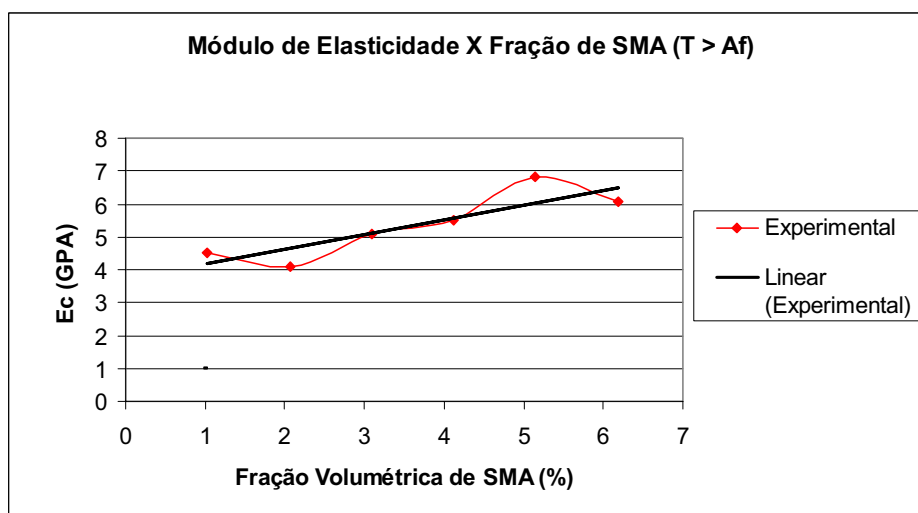


Figura 4.22- Evolução do  $E_c$  em função de  $\xi_{SMA} - T = 75^{\circ}\text{C}$ .

Verifica-se o mesmo comportamento para a fase austenítica, isto é a incorporação de fios de SMA também eleva o módulo elástico do SMAHC.

A Figura 4.23 mostra uma comparação entre as duas curvas nas fases martensita e austenita.

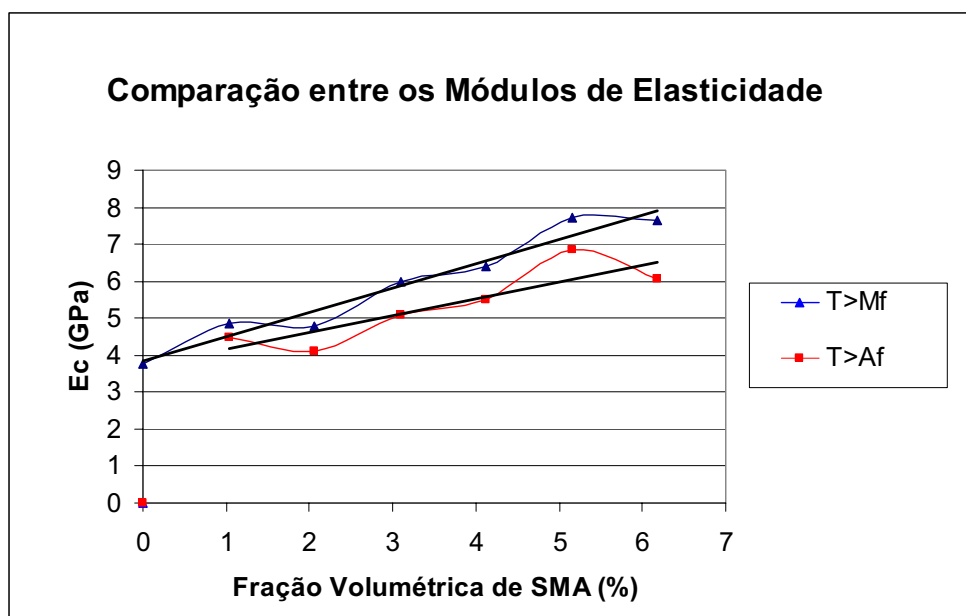


Figura 4.23 - Evolução do  $E_c$  em função de  $\xi_{SMA} - T = 25^\circ\text{C}$  e  $T = 75^\circ\text{C}$ .

Contrariamente ao esperado, a Figura 4.24 mostra que o módulo elástico do SMAHC na fase austenítica é menor do que na fase martensítica. A variação do módulo é influenciada basicamente pela  $\xi_{SMA}$ , que tende a aumentar o módulo do SMAHC e pelo amolecimento da resina com a temperatura, que tende a diminuir o módulo do SMAHC. Conclui-se que, para a faixa de fração de SMA analisada (1,03% a 6,18%), a contribuição negativa do amolecimento da resina é maior do que a contribuição positiva do SMA.

A Figura 4.24 mostra a evolução da deformação máxima em função da  $\xi_{SMA}$  na fase martensítica. Observa-se que na média o percentual de alongamento decresce com a fração volumétrica de SMA.

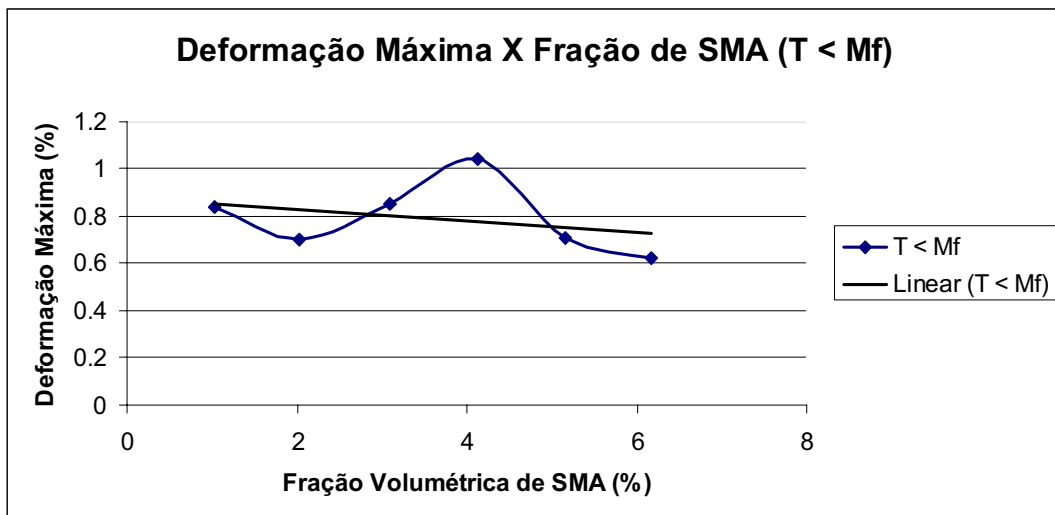


Figura 4.24 - Evolução da deformação máxima em função da  $\xi_{SMA} - T = 25^{\circ}C$ .

Na Figura 4.25, tem-se a evolução da deformação máxima em função de  $\xi_{SMA}$  para  $T = 75^{\circ}C$ .

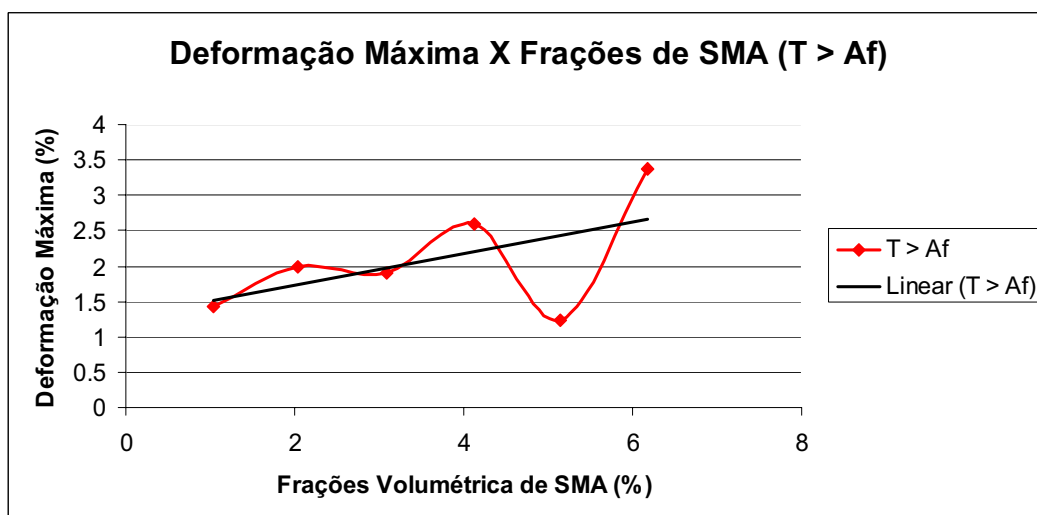


Figura 4.25 - Evolução do %Al em função de  $\xi_{SMA} - T = 75^{\circ}C$ .

Na Figura 4.25 mostra a evolução da deformação máxima em função da  $\xi_{SMA}$  na fase austenítica. Observa-se que o percentual de alongamento cresce com a fração volumétrica de SMA. Observa-se que na média há um ponto de mínimo em 5,15% da fração volumétrica de SMA.

A Figura 4.26 mostra uma comparação entre as duas curvas nas fases martensita e austenita.

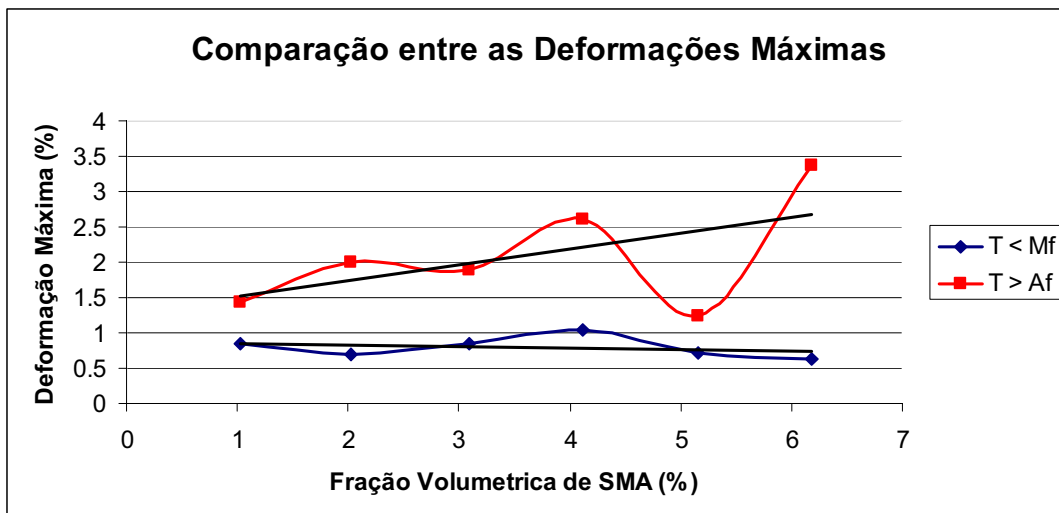


Figura 4.26 - Evolução da deformação máxima em função de  $\xi_{SMA} - T = 25^{\circ}C$  e  $T = 75^{\circ}C$ .

Observa que na fase martensítica a curva da deformação máxima em função da  $\xi_{SMA}$  praticamente constante, variando entre pouco 0,5% Al e 1,0%Al.

A Figura 4.27 mostra a evolução da tensão de ruptura em função da  $\xi_{SMA}$  na fase martensítica. Observa-se que ela cresce com a fração volumétrica de SMA, o que é esperado tendo em vista que, de acordo com as previsões experimentais do item 4.1 Onde o módulo elástico do fio de Niti é maior na fase austenítica em relação a fase martensítica.

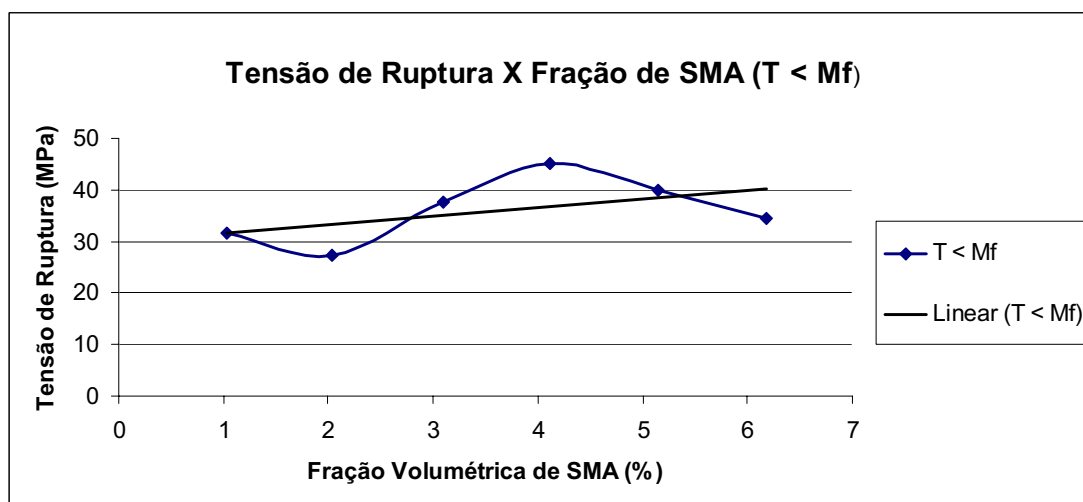


Figura 4.27 - Evolução da  $\sigma_{rup.}$  em função da  $\xi_{SMA} - T = 25^{\circ}C$ .

Na Figura 4.28, tem-se a evolução da tensão de ruptura em função de  $\xi_{SMA}$  na fase austenítica ( $T = 75^{\circ}C$ ).

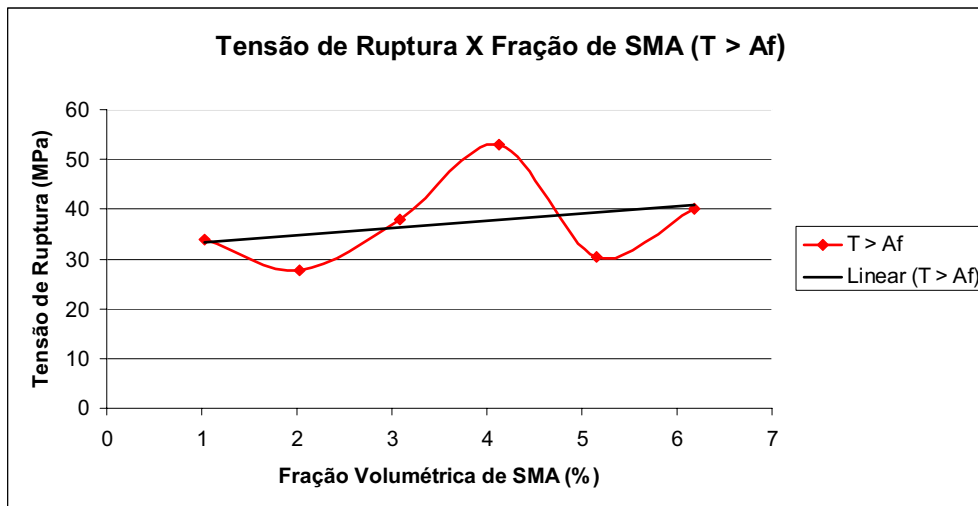


Figura 4.28 - Evolução da  $\sigma_{rup.}$  em função de  $\xi_{SMA} - T = 75^{\circ}C$ .

O comportamento da tensão de ruptura na fase austenítica é similar ao observado na fase martensítica.

A Figura 4.29 mostra uma comparação entre as duas curvas nas fases martensita e austenítica.

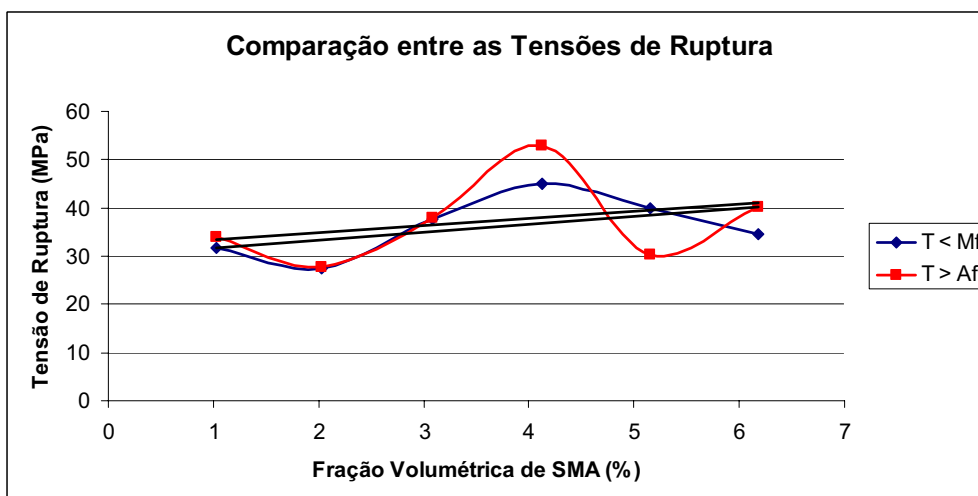


Figura 4.29 - Evolução da  $\sigma_{rup.}$  em função de  $\xi_{SMA} - T = 25^{\circ}C$  e  $T = 75^{\circ}C$ .

De acordo com o esperado, a Figura 4.29 mostra que a tensão de ruptura do SMAHC na fase austenítica é maior do que na fase martensítica. A tensão de ruptura é influenciada basicamente pela  $\xi_{SMA}$ .

## 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

### 5.1 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvida uma análise experimental do comportamento termomecânico de materiais compósitos híbridos com memória de forma, constituídos de uma matriz polimérica (resina epóxi) com fios de NiTi embebidos. Foi analisado o comportamento de algumas propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, deformação máxima e da tensão de ruptura) nas fases martensítica e austenítica em função da fração volumétrica de NiTi. Para isso, foram concebidos, projetados e construídos moldes que permitiram a confecção de corpos de prova SMAHC com fração volumétrica variando entre 0,01 (1,03 % de NiTi) e 0,06 (6,18% de NiTi). Estes corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração nas fases martensítica ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ) e austenítica ( $T = 75^{\circ}\text{C}$ ). Para cada fração volumétrica considerada e para cada temperatura foram ensaiados quatro corpos de prova.

Em ambos os casos, ou seja, na fase martensítica e na fase austenítica, observou-se um aumento do módulo de elasticidade com a fração volumétrica, variando entre 4,80 MPa e 7,72 MPa na fase martensítica e entre 4,10 MPa e 6,84 MPa na fase austenítica. O aumento do módulo de elasticidade com a fração volumétrica era esperado para ambos os casos, uma vez que tanto o módulo elástico da martensita (8,33 GPa) quanto da austenita (17,8 MPa) são maiores do que aquele da resina epóxi (3,75 GPa). Portanto, à medida que o epóxi é substituído pelo NiTi o aumento do módulo é óbvio.

Entretanto, comparando o módulo do SMAHC na fase martensítica com o da fase austenítica observou-se uma variação negativa, ou seja, o módulo dos SMAHC com o fios de NiTi na fase martensítica foi maior que na fase austenítica. Uma vez que o módulo da austenita (17,8 GPa) é maior do que o da martensita (8,33 GPa) esperava-se o contrário. Esta discrepância pode ser atribuída ao amolecimento da resina com a temperatura, que para a faixa de fração volumétrica de NiTi considerada (0,01 a 0,06) contribuiu mais fortemente e negativamente para o módulo do SMAHC do que o aumento do módulo em função da fração de NiTi.

Para a deformação máxima foi observado um aumento com a fração volumétrica de NiTi. Entre as fases martensítica e austenítica esta propriedade aumentou em 1,3%.

E para a tensão de ruptura observou-se um aumento com a fração volumétrica de NiTi, e que entre as fases martensítica e austenítica observou-se uma variação de 1,15 MPa positiva de 3,10%.

Em todos os ensaios observou-se a ruptura do corpo de prova na região da redução de sua seção do corpo de prova, o que é um indicativo forte de que as rupturas se deram pela concentração de tensão nestas regiões. Tendo em vista que os *tabs* foram colados ao corpo principal dos cp's, é razoável assumir que a diferença entre a rigidez do material do corpo de prova (resina epóxi) e a do adesivo tenha contribuído também para o aumento da concentração de tensão. A ruptura precoce dos corpos de prova limitou forçadamente o desenvolvimento da análise numa faixa de tensão menor do que a que seria possível, caso as rupturas tivessem ocorrido na área central do CP. Portanto, a tensão de ruptura do material SMAHC obtida na análise é provavelmente muito menor do que a tensão de ruptura real.

Tendo em vista que o objetivo do trabalho era levantar curvas tensão-deformação para diferentes frações de SMA a diferentes temperaturas ( $T < M_f$  e  $T > A_f$ ), e desenvolver uma análise comparativa entre os resultados obtidos para  $T < M_f$  e  $T > A_f$ , considera-se que os resultados referentes ao comportamento elástico, foram alcançados. Entretanto, tendo em vista que a faixa de tensão/deformação da análise foi restringida pela ruptura precoce dos corpos de prova, e que a variação da fração volumétrica de SMA também restringida a uma faixa relativamente pequena, os resultados obtidos e as decorrentes conclusões não podem ser generalizadas.

## 5.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista a continuidade da pesquisa iniciada com este trabalho, sugerem-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- i) **Reprojeto do corpo de prova:** as rupturas precoces observadas nos ensaios de tração limitaram a análise. Portanto, para se dar continuidade ao trabalho é necessário resolver este problema, concebendo um novo corpo de prova ou melhorando o atual. Para isso, sugere-se que seja desenvolvida uma análise de tensões numérica para se chegar ao dimensionamento correto do corpo de prova;
- ii) **Aumento da faixa de fração volumétrica de SMA:** tendo em vista o objetivo maior da caracterização termomecânica de matérias SMAHC é a sua aplicação no controle adaptativo de vibrações, torna-se necessário se ter uma visão real do quão



forte pode ser a variação de propriedades do SMAHC com a temperatura. Neste sentido entende-se que um passo importante é estender a faixa de fração volumétrica de SMA, que neste trabalho ficou entre 1,03% e 6,18%.

- iii) **Adequação da Resina com  $A_f$  da liga de SMA:** Surge a necessidade de adequar a resina ou a liga de SMA, para evitar no momento da mudança de fase da liga que ocorra o amolecimento de mesma.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. BAZ , S. POH, J. RO AND J. GILHEANY: **J. Sound and Vibration** Vol. 185, p. 171-185, 1995.

ALVES, L. F. R. **Fabricação e Testes Preliminares de um Compósito Ativo de Matriz Polimérica Reforçada por Fios Ti-Ni com Memória de Forma**. PIBIC/CNPq – UFCG (2005-2006), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

AMARO. J. C. CUIDADOS NA PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIES. Tratamento de superfície, São Paulo, n. 136, p. 38-38, março/abril 2006.

ASUNDI, A. **Polarimetric Sensors for Strain Measurement and Damage Detection**. Smart Structures, Materials and MEMS: Bangalore, India 1996.

ARAÚJO, C. J.; RODRIGUES, L. F. A.; BATISTA; R. P. **Fabricação e testes preliminares de um compósito ativo: matriz polimérica reforçada por fios Ti-Ni com memória de forma**. III Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, PIBIC/CNPq/UFCG, 2006.

ATTANASIO, M., BATTAINI, M., CASCIAT, F., MARIONE, A., **Use of shape memory alloy for seismic isolation devices**, 7th Int. Conf. on Adaptive Structures, Rome, 1996.

AIKEN, I. D., KELLY, J. M., **Earthquake simulator testing and analytical studies of two energy-absorbing system for multistory structures**, University of California, Berkeley, Report UCB/EERC-90-03, 1990.

BALAPGOL, B. S., BAJORIA, K. M., KULKARNI, S. A., **Natural Frequencies of Multilayer SMA Laminated Composite Cantilever Plate**, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 15, pp. 1021-1032, 2006.

BALAPGOL, B. S., BAJORIA, K. M., KULKARNI, S. A., **Natural Frequencies of Multilayer SMA Laminated Composite Cantilever Plate**, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 15, pp. 1021-1032, 2006.

BANKS, H.T., SMITH, R. C. e WANG, Y. **Smart Material Structures: Modeling, Estimation and Control**. *Research in Applied Mathematics* Paris: Wiley Masson, 1996.

BARNES, C. **Shape memory and superelastic alloys**. Cooper Development Association INC., New York, jul 1999. Disponível na Internet. <http://www.copper.org/innovations/1999/07/shape.html> em 20 de set. 2006.

BAZ, A., IMAN, K., AND MCCOY, J., **Active Vibration Control of Flexible Beams Using Shape Memory Actuators**, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 140(3), pp. 437–456, 1990.

BAZ, A., POH, S., GILHEANY, J., **A Multi-Mode Distributed Sensor for Vibrating Beams**, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 165, No. 3, pp. 481-495, 1993.

BAZ, A., POH, S., GILHEANY, J., **A Multi-Mode Distributed Sensor for Vibrating Beams**, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 165, No. 3, pp. 481-495, 1993.

BERNARDINI, D., BRANCALEONI, F., **Shape memory alloys modeling for seismic applications**, MANSIDE Project, Rome, II73-84, 1999.

BIRMAN, V., **Effects of SMA dampers on linear vibrations of elastic structures**, Proc. SPIES 3038, pp. 268-276, 1997

BIRMAN, V.: **“Micromechanics of Composites with Shape Memory Alloy Fibers in Uniform Thermal Fields,”** *AIAA Journal*, 34(9), pp. 1905–1912, 1996.

BORDEN, T. **Shape Memory Alloys: Forming a Tight Fit**, *Mechanical Engineering*, pp. 66-72, 1991.

BRAILOVSKI, V., TROCHU, F., LÉBOUEF, A., **Design of shape memory linear actuators**, **SMST Conference**, Asilomar, CA, 1997.

BUEHLER, W.J., GILFRICH, J.V., WILEY, R.C. **Appl. Phys.**, Vol 34, p. 1475, 1963.

C.R. FULLER, S.J. ELLIOT AND P.A. NELSON: **Active Control of Vibration** Academic Press Limited, London 1996.

CALLISTER, Jr, W. D., **Estruturas Poliméricas**. *In: Callister WDJr. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC; 2002. cap.15, p.308-26.

CALLISTER, William. D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Editora LTC. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Utah, 5ª Edição, 2000.

CARDONE, D., DOLCE, M., BIXIO, A., NIGRO, D., **Experimental tests on SMA elements**, MANSIDE Project, Roma, 1999.

CARLSON, J. D.; SPENCER Jr., B. F. **Magneto-Rheological Fluid Dampers for Semi-Active Seismic Control**. Proc. 3rd Int. Conf. on Motion and Vibration Control, Chiba, Japan, 1996.

CARLSSON, L.A.; PIPES, R.B. **Experimental Characterization of advanced composite material**. 2 ed. Lancaster: Technomic Publishing Company, Inc 1987.

CHANG, L.C.; READ, T.A. **Trans. AIME**, Vol 191, p. 47, 1932.

CHOI, S. B.; HWANG, J. H., **Structural vibration control using shape memory actuators**, Journal of Sound and Vibration, Vol. 231, No. 4, pp.1168-1174, 2000.

CLARK, P. W., AIKEN, I. D., KELLY, J. M., HIGASHINO, M., KRUMME, R. C., **Experimental and analytical studies of shape memory alloy damper for structural control**, Proc. Passive Damping, San Diego, CA, 1995.

CLARK, R. L.; SAUNDERS, W. R.; GIBBS, G. P. **Adaptive Structures: Dynamics and Control**. John Wiley & Sons, Inc. 1998.

DA SILVA, E. P., MESQUITA, A. A. **Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. Nata, RN, CD-ROM, 2000.

DA SILVA, E.P. **Aplicação de ligas com memória de forma em estruturas adaptativas**. Série Arquimedes, Vol. 2, Anais do DINCON 2003, pp. 2358-2387. Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, São José dos Campos, SP, 2003.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. Oxford University Press, Inc., New York, NY, USA, 2006.

DAVOODI, H., NOORI, M. N., HOU, Z., DIMENTBERG, M., **Application of shape memory alloys in vibration control**, Proc. 16th Can. Congr. Applied Mechanics, CANCAM, Quebec, 1997.

DELAEY, L., KRISHNAN, R. V., TAS, H. **Thermoelasticity, pseudoelasticity, and the memory effects associated with martensitic transformations. Part 1**. Structural and microstructural changes associated with the transformations. Journal of Materials Science, 9 ed., p. 1521-1535. 1974.

DOLCE, M., MARNETTO, R., **Seismic devices based on shape memory alloy**, Manside Project, Roma, II105-134, 1999.

EATON, J. P., **Feasibility study of using passive SMA absorbers to minimize secondary system structural response**, Dissertação de Mestrado, Worcester Polytechnic Institute, MA, 1999.

FARIA, V. A.; **Análise de Frequência Natural em Vigas Compósitas com fios com Memória de Forma Embebidos**, Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação MTARH.DM-17A/99, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 113p. 2007.

FELIPE, R. C. T. S., “Comportamento Mecânico e Fratura de Moldados em PRFV”, Dissertação de mestrado, p. 109, UFRN, Natal-RN, Brasil, 1997.

FERNANDES, Francisco Manuel Braz. **Ligas com Memória de Forma**. Departamento de Ciência dos Materiais / CENIMAT, Universidade Nova de Lisboa, 2003.

FRENZEL, J.; ZHANG, Z.; NEUKING, K.; EGGELER, G. **High quality vacuum induction melting of small quantities of NiTi shape memory alloys in graphite crucibles**. Materials science e engineering, v. A368, p. 299-310, 2004.

FUNAKUBO, H., Shape Memory Alloys, Ed. Hiroyasu Funakubo, University of Tokyo, Capítulo 1, 1987.

GANDHI, M. V.; THOMSON, B. S. **Smart Materials and Structures Technologies**. An intelligence report, Technomic Publishing Company, Lancaster, U.S.A., 1994.

GARCIA, A; SPIM, JA; SANTOS, CA, Ensaio dos Materiais. Ed LTC, Rio de Janeiro, 2000.

GIBSON, R. F. **Principles of Composite Material Mechanics**. Ed. McGraw-Hill, New York 1994.

GOTTHARDT, R., BIDAUX, J. E., **Function materials based on polymer matrix composites with embedded shape memory alloy**. In.: Int. Conf. Displacive Phase Transf. & their application in Material Engineering, TMS Publications, Inur K. (Editor), pp. 157-166, 1988.

GOTTHARDT, R., BIDAUX, J. E., **Function materials based on polymer matrix composites with embedded shape memory alloy**. In.: Int. Conf. Displacive Phase Transf. & their application in Material Engineering , TMS Publications, Inur K. (Editor), pp. 157-166, 1988.

GOTTHARDT, R.; BIDAUX, J. R. **Functional Materials Based On Polymer Matrix Composites with Embedded Shape Memory Alloy Fibers**. TMS Publications, pp. 157-166, 1998.

HE, Y. Y., OI, S., CHU, F.L., LI, H.X., **Vibration control of a rotor-bearing system using shape memory alloy**: I. Theory, Smart Mater. Struct, Vol. 16, pp.114-121, 2007.

HODGSON D. E, WU M. H., BIERMANN R. J. **Shape Memory Alloys**, Metals Handbook. Vol. 2. ASM International, Ohio, 897-902, 1990.

INAUDI, J., KELLY, J. M., **Experiments on tuned mass dampers using viscoelastic, frictional and shape memory materials**, 1st World Conf. on Structural Control, Los Angeles, CA, Vol. 2, pp. 127-136, 1994.

JANOCHA, H. **Adaptronics and Smart Structures Basics**. Materials, Design and Application, 1999.

KRISHNAN, R.V.; DELAEY, L.; WARLIMONT, H. et al. **Thermoelasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations, Part.1 Structural and microstructural changes**. Journal of Materials Science, v.9, p.1521-1535, 1974.

KRUMME, R., HAYES, J., SWEENEY, S., **Structural damping with shape-memory alloys : one class of devices**, Proc. SPIE 2445, pp. 225-240, 1995.

KUANG, K. S. C., CANTWELL, W. J., **The use of plastic optical fibres and shape memory alloys for damage assessment and damping control in composite materials**. Sci. Technol. Vol. 14, pp. 1105-1313, 2003.

LIANG, C., ROGERS, C. A., AND FULLER, C. R., **Acoustic Transmission and Radiation Analysis of Adaptive Shape Memory Alloy Reinforced Laminated Plates**, Journal of Sound and Vibration, Vol. 145(1), pp. 23-41, 1991.

NIE, J, YAN, X., **Intelligent Bearing System for passing through Critical Speed of Aeroengine Rotor by Changing Stiffness using SMA Wires**, Materials Science Forum, Vol. 327-328, pp. 99-102, 2000.

MACHADO, L.G. & SAVI, M.A. **Aplicações Odontológicas das Ligas com Memória de Forma”, Revista Brasileira de Odontologia**. v.59, n.5, pp.302-306, 2002.

MANTOVANI D. **Shape memory alloys: Properties and biomedical applications**. Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 52: 36-44, 2000.

MATTHEWS, F.L.; RAWLINGS, R.D. **Composite materials: engineering and science**. Chapman & Hall, London, 1994.

MENDONÇA, P. T. R. **Materiais Compostos & Estruturas-Sanduiche: Projeto e Análise**. Ed. Manole, Barueri, São Paulo, Brasil, 2005.

MICHAEL F. A. and DAVID R. H. J., “Engineering Materials”, Pergamon Press: Oxford, 1980.

MOULSON, A. J.; HERBERT, J. M. **Electroceramics**. Chapman & Hall, London 1990.

NASCIMENTO, D. Ferros Fundidos Cinzentos, Nodular, Vermicular e Branco. Sociedade Educacional de Santa Catarina, Escola Técnica Tupy. Joinville: Departamento de Materiais, 1998.

NIE, J, YAN, X., **Intelligent Bearing System for passing through Critical Speed of Aeroengine Rotor by Changing Stiffness using SMA Wires**, Materials Science Forum, Vol. 327-328, pp. 99-102, 2000.

NORBERT, J.; ESCHER, K.; HALTER, K.; HORNBOKEN, E. **Modell Eines Roboters aus Formgedächtnismetall: Forschung im Ingenieurwesen**. Vol. 58, No. 3, pp.46-49. of a Cantilever Beam. Journal of Guidance, Control and Dynamics, v.8, n 5, pp 605-611, 1992.

OLMI, C., SONG., G., MO., Y.L., **An innovative and multi-funcional smart vibration platform, Smart Mater**. Struct, Vol. 16, pp. 1302-1309, 2007.

RADINIOTIS, O. K., LAGOUDAS, D. C., MASHIO, T., GARNER, L. J., QIDWAI, M. A., **Theoretical and experimental investigations of an active hydrofoil with SMA actuators**, Proc. SPIE 3039, pp. 277-289, 1997.

REGELBRUGGE, M. E., CARRIER, A., DICKSON, W. C., **Performance of a smart vibration isolator for precision spacecraft instruments**, J. Intell. Mater. Syst. Struct. Vol. 7, pp. 211-215, 1996.

OLSON, G. B. and COHEN, M. Theory of Martensitic Nucleation: A Current Assessment, Proceeding International Conference on Solid-Solid Phase Transformations, The Metallurgical Society of AIME, pp 1145-1163, 1982.

OTSUKA K. and WAYMAN C. M. **Shape Memory Materials**. Cambridge University Press, ISBN: 0-521-44487 X hardback, 1998.

OTSUKA, K.; REN, X. **Recent Developments in the Research of Shape Memory Alloys**. Intermetallics, 7, pp. 511-528, 1999.

PAINE J. S. N.; ROGERS C. A. **Review of Multi-Functional SMA Hybrid Composite Materials and their Applications**. Adaptive Structures and Composite Materials: Analysis and Application, AD-Vol. 45/MD-Vol. 54, 37-45, ASME, 1994.

PAIVA, A. **Modelagem do comportamento termomecânico das ligas com memória de forma**. Rio de Janeiro, 2004. 113 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.

PANZERA, T. H. **Estudo do comportamento mecânico de um compósito particulado de matriz polimérica**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, 2003.

ROGERS, C. A. **Intelligent Material Systems–The Dawn of a New Materials Age**. Journal of Intelligent Materials System and Structures, Vol. 4, Technomic Publishing Company, Lancaster, U.S.A., 1993.

ROGERS, C. A.; ROBERTSHAW, H. H. **Shape Memory Alloy Reinforced Composites**. Engineering Science Preprints 25, Society of Engineering Science, Inc., ESP25.8027, 1988.

ROH, J. H., HAN, J. H., LEE, I., **Effects of Shape Memory Alloys on Structural Modification, Key Engineering Materials**, Vol. 270-273, pp. 2120-2125, 2005.

RYHANEN, J. **Biocompatibility Evaluation of Nickel-Titanium Shape Memory Metal Alloy**. Tese (Doutorado)-Faculty of Medicine, Oulu University, Oulu, Finlândia, 117p. 1999.

SAADAT, S., SALICHS, J, NOORI, M., HOU, Z., DAVOODI, H., BAR-ON, I., SUZUKI, Y., MASUDA, A., **An Overview of Vibration and Seismic Application of NiTi Shape Memory Alloy., Smart Mater. Struct.**, Vol. 11, pp. 218-229, 2002.

SCHETKY, L., MCD., **The Role of Shape Memory Alloys in Smart Adaptive Structures**, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 246, Eds. C. T. Liu, H. Kunsmann, D. Otsuka and Wuttig, pp. 299–307, 1992.

SAADAT, S., SALICHS, J, NOORI, M., HOU, Z., DAVOODI, H., Bar-on, I., Suzuki, Y., Masuda, A., **An Overview of Vibration and Seismic Application of NiTi Shape Memory Alloy.**, Smart Mater. Struct., Vol. 11, pp. 218-229, 2002.

SAADAT, S.; Salichs, J.; Noori, M.; Hou, Z.; Davoodi, H.; Bar-on, I., Suzuki, Y.; Masuda, A.; An overview of vibration and seismic applications of NiTi shape memory alloy, Smart Mater. Struct. 11, 218-229 2002.

SCHETKY, L., McD., **The Role of Shape Memory Alloys in Smart Adaptive Structures**, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 246, Eds. C. T. Liu, H. Kunsmann, D. Otsuka and Wuttig, pp. 299–307, 1992.

SHAHIN, A.R., MECKL, P. H., JONES, J. D., **Modeling of SMA tendons for active control of structures**, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 8, No. 1, pp. 51-70, 1997.

SHAW, J. A.; KYRIAKIDES, S. **Thermomechanical Aspects of Ni-Ti**. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 43 (8): pp. 1243-1281, 1995.

SINTEF, Petroleum Research. **Detailed study of shape memory alloys in oil well applications**. Report, July 1999.



THOMSON, P., BALAS, G. J., NALBANTOGLU, V., **Shape memory alloys for augmenting damping of flexible structures**, AIAA Guidance Navigation and Control Conf., San Diego, CA, 1996.

TSOI, Kelly A.; SCHROOTEN, Jan; ZHENG, Yanjun; STLMANS, Rudy. **Thermomechanical response of TiNi fiber-impregnated CFRP composites**. Materials letters, v. 59, p. 2472-2475, 2005.

TURNER, T. L. **SMA Hybrid Composites for Dynamic Response Abatement Applications**. 7th International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics, 1, 453-465, ISVR, University of Southampton, Southampton, UK, 2000.

TURNER, T.L. **Thermomechanical Response of Shape Memory Alloy Hybrid Composites**. NASA/TM-2001-210656, Langley Research Center, Hampton, Virginia, 2000.

VALENTE, C., CARDONE, D., LAMUNACA, B. G., PNZO, F. M., **Shaking table tests of structures with conventional and SMA based protection devices**, MANSIDE Project, Roma, III777-192, 1999.

VENKATESH, A., HILBORN, J., BIDAUX, J. E., AND GOTTHARDT, R., **Active Vibration Control of Flexible Linkage Mechanisms Using Shape Memory Alloy Fiber-Reinforced Composites**, Proceedings of the 1st European Conference on Smart Structures and Materials, Glasgow, UK, May 12–14, pp. 185–188, 1992.

WAYMAN, C. M., DUERIG, T. W. **Engineering Aspects of Shape Memory Alloys**. eds. DUERIG, T.W., MELTON, K. N., STÖCKEL, D., WAYMAN, C. M. Butterworth-Heinemann. p. 3-20. 1990.

WHITTLE, M.; ATKIN, R.; BULLOUGH, W. A. **Dynamics of an Electro-Rheological Valve**. Proc. 5th Int. Conf. on ERF/MRS held SMMART Sheffield. World Scientific Publ. pp. 100-117, 1995.

WILLIAMS, K.A; GEORGE, T.C.C; BERNHARD, R.J. **Nonlinear control of a shape memory alloy adaptive tuned vibration absorber**. Department of Mechanical Engineering, The University of Alabama, USA, 2002.

WILLIAMS, K., CHIU, G., BERNHARD, R. **Adaptive-Passive Absorbers Using Shape Memory Alloys**. Journal of Sound and Vibration, v.249. n.5, p.835-848, 2002.

WOLSTENHOLME, W.E. Characterizing impact behavior of thermoplastics. Journal of Applied Polymer Science, v. 6, n.21, p.332-337, 1962.

WU, S. K. & LIN, H. C. **Recent development of TiNi-based shape memory alloys in Twain**. Materials Chemistry and Physics, 64: 81-92 2000.

YEUNG, P. and BROUTMAN, L.J. The effect of glass-resin interface strength on the impact strength of fiber reinforced plastics. *Polymer Engineering and Science*, v. 18, n. 2, p.62-71, 1978.

ZAK, A.J.; CARTMELL, M.P.; OSTACHOWICZ, W. M. **Dynamics and control of a rotor using an integrated SMA/composite active bearing actuator.** *Key Engineering Materials*, Switzerland, v. 245-246, p. 233-240, 2003.

ZHAO, L. C.;, Research and applications of shape memory and superelastic alloys, *Rare Metal Materials and Engineering*, 30: Suppl. S. 2001.

ZHENG, Yanjun; CUI, Lishan; SCHROOTEN, Jan. **Thermal cycling behaviors of a NiTiCu wire reinforced Kevlar/epoxy composite.** *Materials letters*, v. 59, p. 3287-3290, 2005.

LAGOUDAS, D.C.; BOYD, J. G. **A Thermodynamical Constitutive Model for Shape Memory Materials – Part II: The SMA Composite Material.** *Int. J. of Plasticity*, 12(7), p. 843–873, 1991.

## ANEXO I: Sistema de resina epoxídica SQ 2001 e SQ 3131



**SILAEX<sup>®</sup> QUÍMICA LTDA.**

Rua Santa Ubaldesca, nº 191 - Jaguaré - 05323-050 - São Paulo - SP

Tel.(PABX): 11- 3766-7202

[www.silaex.com.br](http://www.silaex.com.br) e-mail: [silaex@silax.com.br](mailto:silaex@silax.com.br)

### **SQ 2001 e SQ 3131** **SISTEMA DE RESINA EPOXÍDICA**

#### **APRESENTAÇÃO**

Este sistema epoxídico foi especialmente desenvolvido para atender às necessidades de colagem, reparos de emergência e revestimentos em plástico reforçado em espessuras inferiores a 03 mm por vez, metais, cimento, concreto ou fibrocimento. Também pode ser usado na fabricação de peças ou onde se necessite um material com baixo escorrimento em laminações e com uma boa resistência química e mecânica.

#### **VANTAGENS**

- Facilidade de Processamento
- Contração mínima. Não libera subprodutos.
- Excelentes propriedades dielétricas com alta isolamento.
- Resistência química elevada, especialmente ao intemperismo e umidade.
- Estabilidade aos ciclos térmicos, impactos e ações mecânicas.
- Boa adesão. Alta dureza e resistência à abrasão
- Fácil impregnação na aplicação em laminação.

#### **CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES**

	<b>Resina SQ 2001</b>	<b>Endurecedor SQ 3131</b>
Aparência	líquido incolor viscoso	líquido âmbar
Viscosidade, 20°C, cPs	11.000 a 14.000	3.000 +/- 1000
Peso Específico, 20°C, g/cm <sup>3</sup>	1,16 +/- 0,01	1,10 +/- 0,05
Peso epóxi equivalente (EEW)	182 – 192	

#### **PROPRIEDADES DO SISTEMA NÃO CURADO**

Proporção de mistura (Resina: Endurecedor) .....	100:23 partes em peso.
Temperatura de manipulação (°C) .....	18 - 30.
Tempo de utilização da mistura 100g (gel time) a 25°C .....	10 a 15 min.
Tempo de endurecimento da mistura (100g , 20°C) .....	1 a 3 horas.
Cura total a 20°C .....	48 a 72 horas.

#### **RESINA BASE**

A resina epoxídica base do sistema é um produto líquido, resultante da reação da Epícloridrina com o Bisfenol A.

#### **ENDURECEDOR**

O endurecedor à base de poliamina modificado promove a melhor adesão com boa resistência térmica, química e mecânica com baixa exotermia, possuindo boa solubilização na resina com proporções não críticas, permitindo cura homogênea com boa velocidade e propriedades finais bastante controláveis.

#### **ARMAZENAGEM**

Resinas epoxídicas são estáveis por um longo período de tempo à temperatura ambiente. Devem ser armazenados em locais seco e ventilado entre 18 a 30°C preferencialmente nas embalagens originais.

Vida útil: Dentro das especificações de armazenagem, as embalagens não abertas tem vida útil garantida de no mínimo 12 (doze) meses, todavia o material pode resistir vários meses mais.



## SILAEX® QUÍMICA LTDA.

Rua Santa Ubaldesca, nº 191 - Jaguaré - 05323-050 - São Paulo - SP

Tel.(PABX): 11- 3766-7202

[www.silaex.com.br](http://www.silaex.com.br) e-mail: [silaex@silax.com.br](mailto:silaex@silax.com.br)

### TOXICOLOGIA

❖ Riscos a serem observados no manuseio da resina

**Pele:** A resina epóxi é essencialmente não irritante a pele, todavia pode causar sensibilidade.

A susceptibilidade a irritações de pele ou sua sensibilidade varia de pessoa para pessoa.

**Inalação:** Inalação de vapores de não é considerada um problema, a não ser que a resina esteja aquecida quando poderá causar leve irritação das vias aéreas superiores se a exposição for prolongada.

**Ingestão:** A resina apresenta baixa toxicidade oral.

**Contato com os olhos:** O contato com os olhos pode resultar somente em uma leve irritação temporária.

❖ **Riscos a serem observados no manuseio do endurecedor**

O endurecedor é potencialmente capaz de causar irritações de pele e dos olhos, às vezes queimaduras, dependendo da severidade do contato. Usar EPI adequado.

### PRECAUÇÕES NO MANUSEIO DO SISTEMA

- ⇒ Instruções contínuas ao pessoal envolvido no manuseio dos compostos químicos deverão ser dadas no que tange às conseqüências do contato com a pele, olhos e inalação, tanto quanto as precauções necessárias para a operação segura.
- ⇒ Resinas epoxídicas e seus endurecedores podem causar intoxicações e portanto devem ser manuseadas com segurança, seguindo três princípios básicos:
  - EVITE CONTATO COM A PELE OU COM OS OLHOS
  - EVITE INALAR VAPORES
  - EVITE A INGESTÃO
- ⇒ Vestimenta apropriada e EPI's são desejáveis para evitar o contato. O tipo específico de vestimenta depende da operação a ser realizada. Vestimenta improvisada aumenta o risco de acidentes..
- ⇒ A contaminação da área de trabalho deve ser minimizada pelo emprego de recursos capazes de evitar esta contaminação, tais como mesas e aparelhos para processamento limpos e dispostos com segurança. O local de aplicação deve ser isolado de outras áreas de trabalho afim de evitar a exposição de pessoas e equipamentos de áreas adjacentes.
- ⇒ O contato com o material pode ser evitado pelo uso de luvas ou papel absorvente em caso de derramamento.
- ⇒ A inalação de vapores pode ser prevenida com suficiente ventilação.

### OBSERVAÇÕES

As informações e dados contidos neste boletim, correspondem aos nossos conhecimentos atuais corrigidos por pessoal técnico capacitado e confiável. Devem ser tomados como orientação, e indicações de uso não são sugestões para se infringir qualquer patente ou legislação. O usuário deverá testar o desempenho em suas condições específicas, contando com informações que possamos fornecer. Nossa responsabilidade restringe-se a qualidade do nosso material e a reposição do que comprovadamente esteja fora de nossos parâmetros, uma vez que não temos controle sobre os processos e usos por parte de terceiros.