

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEMEC

**ANÁLISE DOS ESFORÇOS NO ENSAIO DE
FLEXÃO DO MATERIAL COMPÓSITO
INTELIGENTE UNIAXIAL REFORÇADO COM
FIBRAS DE VIDRO CONTÍNUAS E FIO DE SMA
EM MATRIZ EPOXÍDICA**

Igor Chaffin Nunes Rangel Gomes

Tharcy da Costa Gonçalves

Prof. Orientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Coorientadora: Eng. Rosemere de Araujo Alves Lima

**Rio de Janeiro
Novembro de 2018**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise dos esforços no ensaio de flexão do material
compósito inteligente uniaxial reforçado com fibras
de vidro contínuas e fio de SMA em matriz epoxídica**

Igor Chaffin Nunes Rangel Gomes
Tharcy da Costa Gonçalves

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar
Coorientadora: Eng. Rosemere de Araujo Alves Lima

**Rio de Janeiro
Novembro de 2018**

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

- G633 Gomes, Igor Chaffin Nunes Rangel
Análise dos esforços no ensaio de flexão do material compósito inteligente uniaxial reforçado com fibras de vidro contínuas e fio de SMA em matriz epoxídica / Igor Chaffin Nunes Rangel Gomes, Tharcy da Costa Gonçalves.—2018.
xiii, 71f. + anexo : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.
- Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.
Bibliografia : f. 65-71
Orientador : Ricardo Alexandre Amar de Aguiar
Coorientadora : Rosemere de Araujo Alves Lima
1. Engenharia mecânica. 2. Flexão (Engenharia civil). 3. Ligas com memória de forma. 4. Fibras de vidro. 5. Materiais compostos. I. Gonçalves, Tharcy da Costa. II. Aguiar, Ricardo Alexandre Amar de (Orient.). III. Lima, Rosemere de Araujo Alves (Coorient.). IV. Título.

CDD 621

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho às nossas famílias que foram nossos primeiros educadores, apoiadores e incentivadores.

AGRADECIMENTOS

Eu, Igor, agradeço aos meus pais, Rosa e Luis Cláudio, por me trazerem até aqui. Em especial à minha mãe, que sempre está presente e tanto me ajudou, orientou e apoiou ao longo do tempo.

Aos meus avós, José e Ilka, que além de serem uma das minhas bases, me apoiam sempre e tanto me ajudaram nesses anos todos.

Aos meus tios, Rogério e Ricardo, que são pessoas nas quais sempre pude contar em tudo, que estão presentes quando preciso.

Ao meu tio Rogério, por ter me inspirado a seguir esse caminho das Exatas e Tecnológicas, por tirar tantas dúvidas de matemática e física ao longo da vida com tanta paciência.

Agradeço também à minha namorada, Larissa, que sempre me acalmou nos momentos de dificuldade, que está sempre ao meu lado me orientando, aconselhando e que sempre me incentivou e acreditou em mim.

Aos meus amigos caninos, que me acalmavam nos momentos de tensão.

Eu, Tharcy, agradeço primeiramente a Deus, por todo discernimento nos dado, por sua luz que sempre nos cerca e por guiar nossos passos.

Aos meus pais Daiber Barbosa Gonçalves e Lindamar Teixeira da Costa, que foram meus maiores incentivadores, conselheiros e estiveram sempre ao meu lado em todas as minhas escolhas.

Ao meu irmão Thalysen da Costa Gonçalves, por ser um exemplo de dedicação e estudo.

À minha namorada Hannah Alves Furtado de Mendonça, que sempre me apoiou, me motivou, me ajudou e aconselhou.

Agradecemos aos amigos que fizemos ao longo do tempo no CEFET/RJ, sem eles os estudos não seriam os mesmos e o aprendizado seria mais difícil.

Ao nosso orientador, Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, que nos deu esse desafio e proporcionou um crescimento, além de ser solícito e sempre nos deu soluções para os nossos questionamentos, sem ele esse projeto não teria acontecido.

À amiga Rosemere de Araujo Alves Lima, nossa coorientadora, que participou ativamente nos dando conselhos importantes para o andar do projeto.

Aos doutorandos Daniel Kawasaki e Jorge Neto, que deram todo suporte no laboratório e nos experimentos, além dos conselhos dados e dúvidas tiradas ao longo deste trabalho.

Ao técnico em mecânica do CEFET/RJ Brenno Duarte Cabral, que sempre esteve presente nos auxiliando em todos os experimentos e dando suporte inúmeras vezes.

Aos professores do CEFET/RJ por todo o conhecimento passado ao longo dessa trajetória para nós. Em especial à professora Tatiane de Campos Chuvas, por acreditar em nós e pela oportunidade de estágio no CEFET/RJ que proporcionou um crescimento sem tamanho e aplicação de diversos conhecimentos adquiridos nesse período.

RESUMO

Materiais compósitos estão cada vez mais presentes em aplicações cotidianas, dentre elas automobilística, médica e aeroespacial, pois são materiais mais leves e resistentes em comparação aos outros. A adição da liga de memória de forma – SMA (*Shape Memory Alloy*), que compreende os materiais que podem mudar suas propriedades ao receberem estímulos externos, tem o intuito de promover uma melhoria como atuador, absorver vibrações, ser aplicado como sensor para descobrir trinca ou danos e aumentar seu potencial de utilização, pois reúne as características dos compósitos e da memória de forma em um elemento único: o compósito inteligente. Este projeto teve como objetivo testar e analisar o comportamento e as características do compósito com liga de memória de forma com um enfoque na sua reação a flexão, proporcionando dados que em conjunto com outros tipos de teste possam servir de guia para futuras aplicações. O estudo dessa estrutura é importante para demonstrar os efeitos de flexão no material compósito de matriz epoxídica com SMA, pois o uso do mesmo é cada vez maior em diversas áreas e aplicações. Considerando o potencial de atuação do material, é interessante prosseguir com a realização de diversos tipos de testes para estabelecer melhor o comportamento do compósito inteligente.

Palavras-chave: compósito inteligente, liga de memória de forma, flexão

ABSTRACT

Composite materials are increasingly present in everyday applications, such as automotive, medical and aerospace, as they are lighter and more resistant materials compared to others. The addition of Shape Memory Alloy (SMA), which comprises materials that can change their properties when receiving external stimuli, is intended to promote an improvement as an actuator, to absorb vibrations, to be applied as a sensor to detect cracks or damage and increase their potential for use, because they combine the characteristics of composite and shape memory alloy into a single element: the intelligent composite. This project aimed to test and analyze the behavior and characteristics of the memory alloy composite with a focus on its flexural reaction, providing data that together with other types of test can guide future applications. The study of this structure is important to demonstrate the effects of bending in the composite material of epoxy matrix with SMA, since its use is increasing in several areas and applications. Considering the performance potential of the material, it is interesting to carry out several types of tests to better establish the behavior of the intelligent composite.

Key words: composite intelligent, shape memory alloy, flexion

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivo	2
1.4	Metodologia	3
1.5	Organização do trabalho	3
2	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1	Materiais Inteligentes.....	4
2.2	Tipos de Materiais Inteligentes.....	5
2.2.1	Fibras Óticas.....	5
2.2.2	Materiais Piezoelétricos	5
2.2.3	Fluidos Eletroreológicos	6
2.2.4	Fluidos Magnetoreológicos	6
2.2.5	Ligas de Memória de Forma	6
2.3	Compósitos	7
2.3.1	Formação dos Compósitos	8
2.3.1.1	Matrizes	9
2.3.1.1.1	Resina Epóxi.....	11
2.3.1.2	Reforço.....	12
2.3.1.3	Aderência.....	13
2.4	Ligas de Memória de Forma.....	14
2.4.1	Ligas com Efeito de Memória de Forma.....	17
2.4.1.1	Ligas de Ni-Ti	17
2.4.1.2	Ligas à base de Cobre	18

2.4.2	Princípios de Funcionamento	19
2.4.2.1	Comportamento Termoelástico.....	19
2.4.2.2	Efeito de Memória de Forma	20
2.4.2.3	Pseudoelasticidade	22
2.4.3	Aplicações	24
2.4.3.1	Engenharia	24
2.4.3.2	Ortodontia	25
2.4.3.3	Medicina	26
2.4.3.4	Aeroespacial.....	27
2.4.3.5	Segurança.....	28
2.4.3.6	Tubulações	28
2.4.3.7	Concretos inteligentes.....	29
2.5	Materiais Compósitos Inteligentes.....	29
2.5.1	Materiais Compósitos Híbridos (SMAHC).....	30
2.5.1.1	Aplicações.....	31
2.5.1.1.1	Robótica.....	31
2.5.1.1.2	Atuador	32
3	Metodologia	34
3.1	Fabricação do molde	34
3.2	Materiais e Métodos.....	40
3.2.1	Fio de SMA	41
3.2.2	Treinamento do Fio de SMA.....	42
3.2.3	Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)	44
3.2.4	Ensaio de Tração do Fio.....	45
3.2.5	Resina	49
3.2.6	Produção do Material Compósito Inteligente.....	49
4	Resultados e Discussão	55

5	Conclusões	63
6	Trabalhos Futuros.....	64
7	Referências Bibliográficas	65
8	ANEXOS.....	72

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: Classificação dos Materiais Compósitos. (DANIEL & ISHAI, 1994).....	8
FIGURA 2.2: Classificação dos Tipos de Matrizes Compósitas.....	9
FIGURA 2.3: Classificação dos Tipos de Matrizes Poliméricas.....	10
FIGURA 2.4: Diagrama esquemático dos mecanismos de adesão na interface fibra-matriz. (NOSSA, 2011)	14
FIGURA 2.5: Austenita e Martensita (OTSUKA, 1998)	16
FIGURA 2.6: Esquema dos dois caminhos de transformação em ligas Ni-Ti (YANG, 2003)	16
FIGURA 2.7: Comportamento Termoelástico do Ni-Ti (PAIVA, 2000).....	20
FIGURA 2.8: Gráfico Tensão x Deformação do Efeito de Memória de Forma do Ni-Ti de uma via (PAIVA, 2000)	21
FIGURA 2.9: Gráfico Tensão x Deformação x Temperatura do Efeito de Memória de Forma do Ni-Ti de duas vias (PAIVA, 2000).....	22
FIGURA 2.10: Gráfico Tensão x Deformação do Comportamento Pseudoelástico (PAIVA, 2000).....	23
FIGURA 2.11: Fios ortodônticos de SMA. Fonte: imgrum.org.....	26
FIGURA 2.12: <i>Guidewire</i> de SMA. Fonte: <i>Terumo Interventional Systems</i>	27
FIGURA 2.13: Microestrutura auto expansível de SMA. Fonte: domtotal.com.....	27
FIGURA 2.14: Dispositivo de liberação de painéis solares de satélites (BUSCH <i>et al.</i> , 1992).	28
FIGURA 2.15: Representação do acoplamento e foto de um acoplamento CryoFit®	29
FIGURA 2.16: Demonstração da fabricação do SMAHC. (CASTILHO, 2008)	30
FIGURA 2.17: Diagrama esquemático do robô lesma. (KIM <i>et al.</i> , 2011)	31
FIGURA 2.18: Módulos robóticos de SMAHC (JIN <i>et al.</i> , 2016).....	32
FIGURA 2.19: Atuador de SMAHC sofrendo deformação pela aplicação de corrente elétrica (RODRIGUE <i>et al.</i> 2017).....	33
FIGURA 3.1: Corte das chapas através da guilhotina.....	35
FIGURA 3.2: Processo de furação das chapas para confecção do molde.	36
FIGURA 3.3: Primeiro modelo de molde proposto.....	36
FIGURA 3.4: Processo de lixamento e limpeza para aplicação de resina no novo molde.....	37

FIGURA 3.5: Pesagem e processo de mistura da resina AR-260 e o endurecedor AH-260...	38
FIGURA 3.6: Aplicação da resina nas chapas cortadas.	38
FIGURA 3.7: Aplicação de chapa pesada.	39
FIGURA 3.8: Utilização da prensa hidráulica para produção do corpo de prova (C.P.)	40
FIGURA 3.9: Gráfico Temperatura x Deformação do fio de SMA.	42
FIGURA 3.10: Montagem para treinamento do fio de SMA	43
FIGURA 3.11: Ensaio DSC do fio FLEXINOL® (SILVEIRA e CHERMONT, 2017)	45
FIGURA 3.12: Caracterização do fio de SMA com Ø0,5mm – Ensaio de tração.	46
FIGURA 3.13: Gráfico Tensão x Deformação - Fio de SMA 1 com Ø 0,5mm.....	47
FIGURA 3.14: Gráfico Tensão x Deformação - Fio de SMA 2 com Ø 0,5mm.....	48
FIGURA 3.15: Gráfico Tensão x Deformação - Fio de SMA 3 com Ø 0,5mm.....	49
FIGURA 3.16: Corte das fibras de vidro nas dimensões desejadas.	50
FIGURA 3.17: Aplicação de resina ao compósito inteligente de fibra de vidro unidirecional e fio de SMA.	51
FIGURA 3.18: Completa impregnação do compósito inteligente.	52
FIGURA 3.19: Compósito submetido ao processo de cura na prensa hidráulica	53
FIGURA 3.20: Compósito pronto para corte dos corpos de prova	53
FIGURA 3.21: Corpo de Prova com fio e sem fio nas dimensões exigidas para teste de comparação.	54
FIGURA 4.1: Ensaio de Flexão do SF-CP1.	55
FIGURA 4.2: Ensaio de Flexão do SF-CP2	56
FIGURA 4.3: Ensaio de Flexão do SF-CP3.	57
FIGURA 4.4: Ensaio de Flexão do F1-CP1.	58
FIGURA 4.5: Ensaio de Flexão do F1-CP2.	59
FIGURA 4.6: Ensaio de Flexão do F1-CP2 com placas.	60
FIGURA 4.7: Ensaio de Flexão do F1-CP3.	61
FIGURA 4.8: Corpos de Prova após os ensaios de Flexão.	61

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: Modulo de Young de diversos materiais (ARMSTRONG <i>et al.</i> , 2005).....	12
TABELA 2.2: Propriedades das ligas binárias com Memória de Forma (LA CAVA et al., 2000)	18
TABELA 2.3: Propriedades das ligas de Memória de Forma à base de Cobre(SMA, 1999) .	19
TABELA 3.1: Propriedades das ligas binárias com Memória de Forma	40
TABELA 3.2: Ficha Técnica do Fio de SMA FLEXINOL® <i>Actuador Wire</i>	41
TABELA 3.3: Parâmetros do ensaio D.S.C. do fio de SMA(SILVEIRA & CHERMONT, 2017)	44
TABELA 4.1: Força Máxima, Deslocamento e Variação entre os compósitos.	62

1 Introdução

Os materiais compósitos são bastante difundidos nas indústrias aeroespacial e automotiva por serem elementos com baixo peso e elevada resistência. São também anisotrópicos, fenômeno em virtude do qual certas propriedades físicas de um mesmo corpo variam de acordo com a direção em que são medidas, podendo apresentar resistência elevada em uma direção e não na outra. Além disso, sua manutenção é de baixo custo (FONTES, 2017).

As ligas de memória de forma são ligas metálicas capazes de sofrer transformações reversíveis da fase martensítica, em decorrência da utilização de cargas termomecânicas, e são capazes de recuperar seu estado inicial aquecendo a liga acima da temperatura de transformação de fase martensítica. Uma liga largamente utilizada é o NiTiNol e pode ser aplicado na engenharia para controle de forma e vibracional, por exemplo (DELAEY *et al.*, 1974; KRISHNAN *et al.*, 1974).

A combinação de materiais compósitos e ligas de memória de forma é a inspiração para esse projeto e tem o objetivo de atrelar propriedades distintas para aplicações como atuadores, por exemplo. O compósito utilizado será formado por matriz epoxídica, fibras de vidro uniaxiais e fios de liga de memória de forma, do tipo NiTiNol, assim, a combinação destes materiais produzirá um compósito inteligente.

Vale a pena ressaltar que existe a problemática da aderência entre ambos os materiais. A matriz e o reforço, por serem materiais diferentes, respondem a uma mesma tensão de formas diferentes. Como as deformações não são iguais, elas possuem um deslocamento relativo, além de apresentarem coeficientes de dilatação diferentes.

1.1 Motivação

Ao longo dos anos, novas técnicas de aperfeiçoamento surgiram e dentre elas podemos citar os compósitos com matriz polimérica. Esse conjunto apresenta diversas vantagens em relação aos demais materiais como, por exemplo, os metais. Seja por sua resistência, densidade ou mesmo pelo comportamento que pode assumir.

A vocação da utilização de SMA (*Shape Memory Alloy*), associado a materiais compósitos e o estudo dos seus efeitos desconhecidos ainda para ciência, propõem uma gama de experimentos e soluções futuras no campo da engenharia. Sua utilização pode reduzir custos, facilitar a confecção e reduzir o peso total de um conjunto mecânico. Por esse motivo, se faz necessário o estudo de flexão deste tipo de material.

1.2 Justificativa

O uso de materiais compósitos com liga de memória de forma acoplada pode ter finalidade de atuador, controle da forma, controle vibracional ou reforço para evitar falhas em metais, por exemplo. A adesão entre estes materiais se torna importante à medida que a indústria torna o uso desta tecnologia crescente. O presente trabalho apresenta uma proposta de verificação das configurações de englobamento de uma liga Ni-Ti a um compósito de matriz epoxídica e reforçado com fibras de vidro aplicados a flexão do material.

1.3 Objetivo

A associação do compósito ao fio de SMA tem o propósito de conferir propriedades melhores ao composto. Para isso, já foram produzidos alguns elementos semelhantes, porém com atuações específicas. Ao mesmo tempo, esses projetos não tiveram a intenção de examinar o comportamento no ensaio de flexão.

Este presente trabalho tem o objetivo de fabricar um molde eficiente para produção de corpos de prova em larga escala e suas limitações, observar se o tipo de resina utilizada é uma escolha adequada para a aplicação. Formas eficientes de travar o fio pré-tensionado no molde, produzir corpos de prova de compósitos inteligentes e analisar o comportamento dos ensaios de flexão do material compósito associado ao fio de SMA, os ciclos termodinâmicos e se houve recuperação das características iniciais após os testes. Além disso, pretende-se observar o comportamento do fio através do ensaio de tração e DSC (Calorimetria Diferencial de Varredura). A intenção é que no futuro se crie um compósito inteligente com um estudo prévio aprofundado e testado, garantindo a eficiência desejada.

1.4 Metodologia

Diversos artigos e publicações foram estudados para uma melhor compreensão das discussões e necessidades sobre o tema. Foi realizada uma análise separadamente dos materiais compósitos de matriz polimérica e a liga de memória de forma utilizadas no projeto, visando seus comportamentos físicos e mecânicos.

Foi estudada a melhor forma de fabricar um molde para a produção do material compósito híbrido e seus materiais utilizados na produção.

Com isso, foram feitos testes de flexão apenas do material compósito preparado apenas com fibras de vidro afim de obter resultados comparativos. O fio foi treinado para adquirir o comportamento de memória de forma desejado para o experimento.

Por fim, a produção e o estudo de flexão do material compósito inteligente e seu comportamento em comparação ao compósito sem o fio de SMA.

1.5 Organização do trabalho

Este trabalho será dividido em 8 capítulos. O primeiro realiza uma breve introdução com abordagem superficial das questões relativas ao foco da pesquisa. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, em que são abordados os conceitos necessários ao trabalho e as características de cada material e estrutura pertinentes ao projeto. Nessa parte, são utilizados embasamentos consolidados na área científica. O terceiro capítulo mostra a metodologia utilizada na elaboração do projeto, com os materiais utilizados e suas características. O quarto capítulo refere-se à discussão dos resultados experimentais obtidos por meio dos ensaios de flexão dos corpos de prova com fio e sem fio de SMA. O quinto capítulo expõe a conclusão. O sexto capítulo apresenta os trabalhos futuros para dar continuidade a pesquisa. O sétimo capítulo refere-se a toda a bibliografia pesquisada e embasada pelo projeto. E, por fim, no oitavo capítulo encontra-se anexado informações adicionais sobre o material utilizado.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Materiais Inteligentes

Os materiais inteligentes, também conhecidos como funcionais, são aqueles que, ao receberem um determinado estímulo, podem alterar sua estrutura e realizar funções específicas. Alguns exemplos são os materiais piezolétricos, os fluidos eletroreológicos e magnetoreológicos e as ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys - SMA*), que é o tema abordado nesse projeto (GANDHI & THOMSON, 1994; JANOCHA, 1999).

Os exemplos citados acima são elementos de aparência ordinária, porém, ao receberem estímulos específicos, como corrente elétrica, campo magnético, variações de temperaturas e tensões mecânicas, por exemplo, apresentam como resposta certas modificações em suas estruturas físico-químicas (GANDHI & THOMSON, 1994). A grande vantagem desses elementos é sua excelente capacidade de resposta a estímulos, o que os tornam ótimos atuadores e sensores, por vezes atuando simultaneamente (GANDHI & THOMSON, 1994).

A intenção de usar materiais inteligentes em estruturas é a possibilidade de suas propriedades mecânicas sofrerem alterações, por atuações externas, permitindo o controle da estrutura para manter o seu funcionamento dentro do padrão estabelecido (JANOCHA, 1999).

São diversas as aplicações de matérias inteligentes, podendo ser utilizados na indústria automobilística, de aviação e aeroespacial, equipamentos eletrônicos (ASUNDI, 1996). Grande parte dessas pesquisas são voltadas para utilização nas áreas médicas e odontológicas; observam-se aplicações na localização de tumores, correção de problemas na coluna, aparelhos dentários e em próteses ortopédicas (ROGERS, 1993) e também nos setores de construção civil (GANDHI & THOMSON, 1994; FERNANDES, 2006)

2.2 Tipos de Materiais Inteligentes

Neste tópico, serão abordadas algumas áreas de atuação dos materiais inteligentes e alguns exemplos.

2.2.1 Fibras Óticas

Fibras óticas são constituídas de filamentos microscópicos, os quais apresentam em seu interior os chamados sensores a retículo de Bragg (FBG), que são pequenos espelhos encarregados pela reflexão de sinais luminosos de determinados comprimentos de onda (BOGOTTO *et al.*, 2015). Tal fato é possível devido a ocorrência da reflexão total, onde índices de refração das camadas externa e interna da fibra sofrem modificações e produzem uma região com descontinuidades, produzindo uma segregação que mantém o sinal no núcleo da fibra (TESSADORI *et al.*, 2011).

A utilização de sensores de fibra ótica possibilita a verificação, de modo online, de diversos problemas, como: danos causados por impactos; delaminações; propagação de trincas; análise de fadiga da estrutura. Esses tipos de identificações ocorrem por alterações no espectro de onda emitido pelo sensor (Fonte: *Intech (Open Science)*).

2.2.2 Materiais Piezoelétricos

Existem materiais que apresentam um deslocamento elétrico ao serem submetidos a esforços mecânicos externos e ao serem submetidos a um campo elétrico desenvolvem uma deformação. Eles são conhecidos como materiais piezoelétricos (JANOCHA, 1999). Como exemplos de materiais piezoelétricos, é possível citar as cerâmicas piezoelétricas, usadas em ultrassonografias, e os polímeros piezoelétricos, que apresentam leveza e flexibilidade para se adaptarem ao formato desejado (GANDHI e THOMSON, 1994).

2.2.3 Fluidos Eletroreológicos

Os fluidos eletroreológicos são partículas polarizáveis no fluido que apresentam mudança significativas e reversíveis nas suas características quando são submetidos a corrente elétrica (JANOCHA, 1999). Ao aplicar-se a corrente elétrica, as partículas sólidas do fluido, quando estão entre duas superfícies metálicas, tendem a se alinhar ao campo elétrico e demonstram um aumento de resistência ao fluxo durante a ação do campo elétrico. Enquanto não se aplica uma tensão cisalhante superior a de escoamento, ele permanece em estado sólido. A modificação de características como tensão limite de cisalhamento e viscosidade através de um campo elétrico favorece sua aplicação como atuadores utilizados em transmissão e suspensões veiculares (JANOCHA, 1999).

2.2.4 Fluidos Magnetoreológicos

Fluidos magnetoreológicos são dispersões de partículas ferromagnéticas que, mediante aplicação de corrente elétrica que induz um campo magnético, tem características como viscosidade e fluxo alteradas (JANOCHA, 1999; WHITTLE *et al.*, 1995).

Ao manter o fluido entre polos magnéticos, sua viscosidade é aumentada, devido a restrição do seu movimento pelas correntes de partículas, que são perpendiculares à direção do fluxo. Por serem anisotrópicos, é imprescindível garantir que as linhas de fluxo sejam perpendiculares a direção do movimento a ser restringido, pois as partículas do fluido tendem a se alinhar com as linhas do campo magnético (SRINIVASAN e MC FARLAND, 2001).

2.2.5 Ligas de Memória de Forma

As ligas de memória de forma são elementos que podem apresentar ótimos níveis de recuperação de deformações mecânicas ao serem aplicadas determinadas temperaturas, dentro

de valores pré-estabelecidos. Esse acontecimento é devido a transição entre as fases martensíticas e austeníticas do material (DELAEY *et al.*, 1974; KRISHNAN *et al.*, 1974).

Este é um dos materiais utilizados no projeto e sua abordagem mais aprofundada se encontra no tópico 2.4.

2.3 Compósitos

A utilização de materiais compósitos é ocasionada pela excelente combinação de materiais diversos que resultam em melhores performances se comparados a outros tipos de elementos.

Os compósitos são, em essência, uma forma de aumentar e melhorar o desempenho de determinados elementos através da introdução de outros. Ao combinar diferentes fases, é possível obter novos produtos com aplicações superiores, se compararmos com suas formas primitivas. Através dos materiais compósitos, é possível obter estruturas com baixa densidade, boa rigidez, resistência ao impacto e a abrasão, além de sua baixa suscetibilidade à corrosão. (CALLISTER, 2000)

O compósito normalmente é constituído por duas fases: a matriz, que é contínua e envolve a fase dispersa. As propriedades dos compósitos são baseadas nas propriedades das fases que a constituem. Consequentemente, suas quantidades relativas e a geometria da fase dispersa influenciam diretamente no seu resultado final (CALLISTER, 2000).

O reforço pode ser de origem particulada ou constituído por fibras, as quais podem ser contínuas ou descontínuas (whiskers). A fase dispersa é responsável por resistir às cargas aplicadas. Já a matriz pode ser cerâmica, metálica ou polimérica. A Figura 2.1 indica a classificação que a fase dispersa pode ter e suas subdivisões. (DANIEL & ISHAI, 1994)

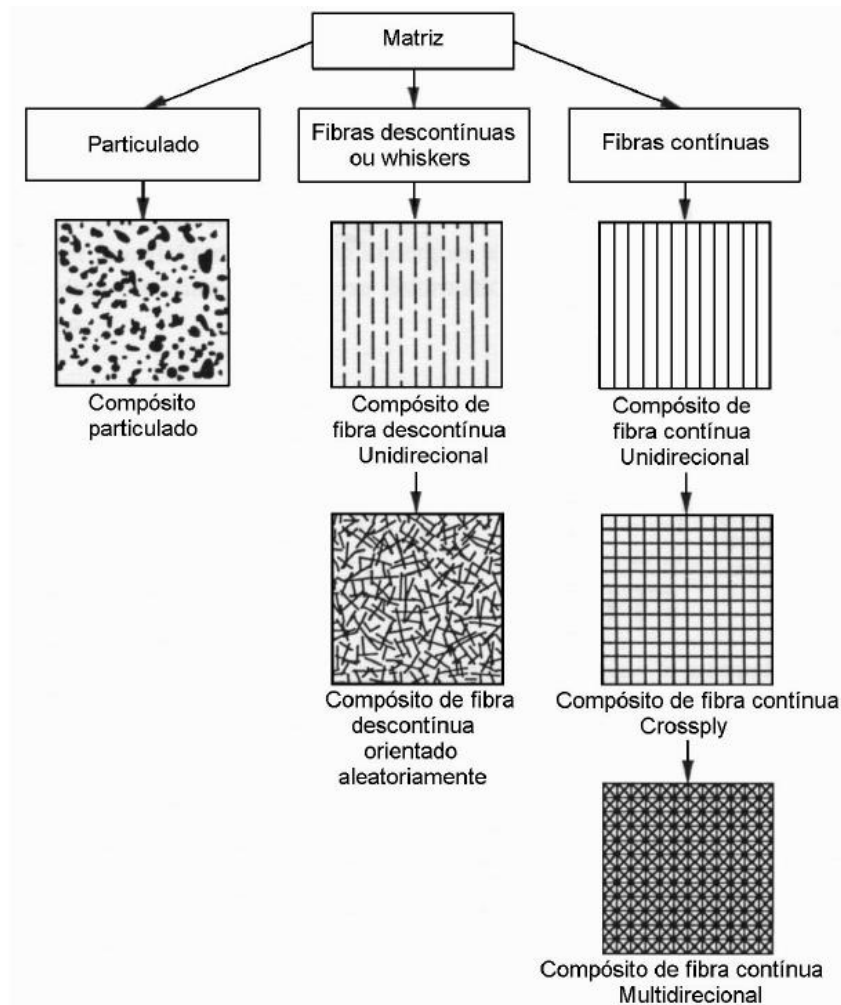


Figura 2.1: Classificação dos Materiais Compósitos. (DANIEL & ISHAI, 1994)

A geometria do reforço é fundamental para a obtenção das propriedades mecânicas do compósito, já que suas características são diretamente proporcionais a forma e dimensão deste componente. (GIBSON, 1994)

O compósito utilizado neste projeto é constituído de matriz polimérica (epoxídica) e fibras unidirecionais de fibra de vidro, além do fio de SMA acoplado.

2.3.1 Formação dos Compósitos

Panzer (2003) descreve que compósitos estruturais são formados por um sistema de materiais constituído por duas ou mais fases em escala macroscópica. Suas propriedades e seu desempenho mecânico são projetados para serem superiores aos materiais atuando

separadamente. A fase dispersa normalmente é descontínua, mais forte e resistente. Já a fase matriz em geral é contínua e menos resistente.

Aqui serão apresentadas cada fase separadamente, com o objetivo de mostrar de forma geral os tipos de matrizes e reforços presentes no mercado, e qual foi escolhida para ser aplicada ao projeto.

2.3.1.1 Matrizes

A principal função da matriz é manter a integridade estrutural do compósito, ligando-se às fibras devido a sua característica adesiva e coesiva (MENDONÇA, 2005), além de transmitir os esforços mecânicos ao reforço e proteger contra intempéries. A matriz pode ser cerâmica, metálica ou polimérica, e a escolha está relacionada ao tipo de aplicação exigido, as propriedades físicas, mecânicas e térmicas, bem como o custo e o processo de fabricação. (GIBSON, 1994)

As Figuras 2.2 e 2.3 representam a classificação das matrizes e a subdivisão das matrizes poliméricas e alguns exemplos.

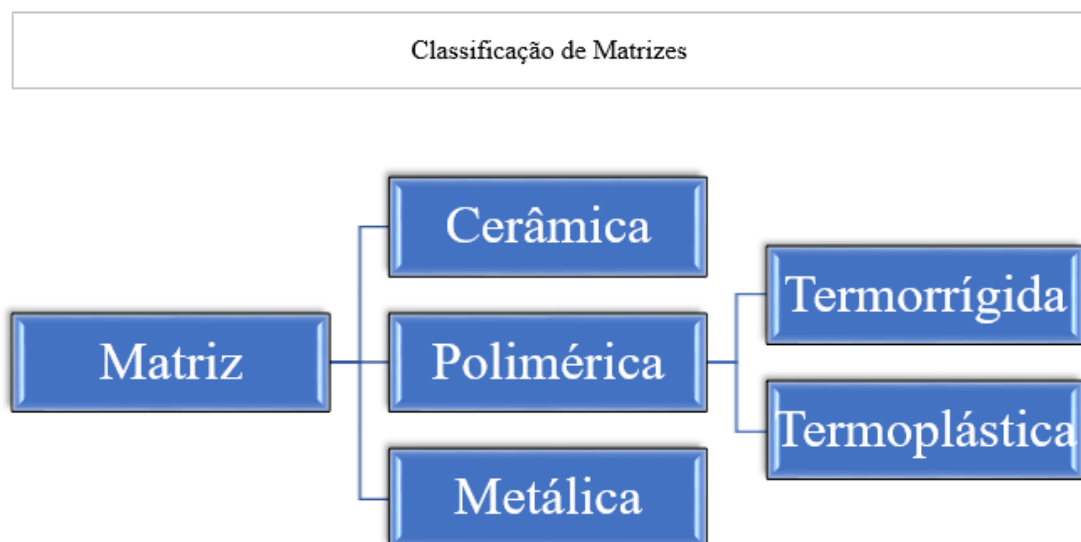


Figura 2.2: Classificação dos Tipos de Matrizes Compósitas

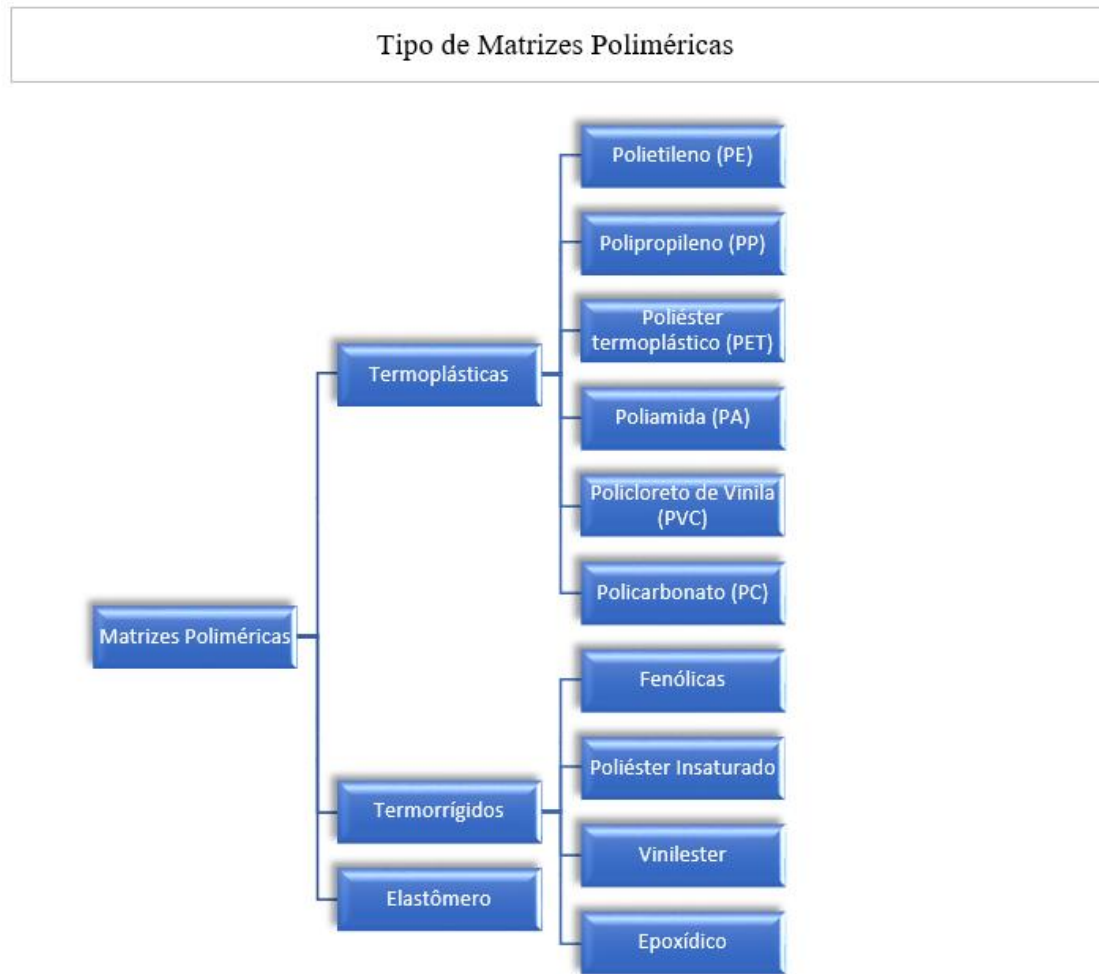


Figura 2.3: Classificação dos Tipos de Matrizes Poliméricas

Existem dois tipos de matrizes poliméricas: As termorrígidas e as termoplásticas. Para a aplicação de reforços estruturais, a matriz termorrígida tem melhores características quando reforçada com fibras. Elas promovem uma boa estabilidade térmica, boa resistência química e baixa fluência. (MENDONÇA, 2005)

A escolha de uma combinação fibra/matriz com boa adesão é fundamental para que as forças adesivas na interface dos materiais sejam fortes, assim a resistência à ruptura do compósito estará diretamente ligada a magnitude de adesão. (CALLISTER, 2000)

As matrizes dos compósitos têm grande influência na resistência mecânica dos materiais, pois ao envolver as fibras do reforço, garantem que a estrutura se mantenha atuante ainda que possíveis falhas possam ocorrer nesse componente, como uma ruptura nas fibras. Nesse tipo de ocorrência, as faces da fibra fraturada se afastam, movidas pela força de tração. A deformação plástica que a matriz sofre origina forças tangenciais, que lentamente irão criar forças de tração em cada segmento. Através deste mecanismo de transferência de forças, a fibra

fraturada continua a contribuir para manter a resistência do compósito. (MIRAMINI *et al.*, 2016)

2.3.1.1.1 Resina Epóxi

Resinas epoxídicas são utilizadas em compósitos com propósitos mais exigentes e seu custo e processo de fabricação mais delicado acompanha tal exigência, no entanto, apresentam melhor resistência mecânica, resistência à água, longa duração, por exemplo.

As resinas epóxi são polímeros que, quando adicionados a um agente endurecedor, se tornam compostos termorrígidos, insolúveis e infundíveis, ou seja, após seu endurecimento, não é possível reverter o seu processo químico e obter sua forma original.

As características que podemos observar nos compostos epoxídicos são: alto poder adesivo, excelente capacidade isolante, boas propriedades mecânicas e elétricas, resistência a ataques químicos entre outras. Esses fatores nos levam a entender o porquê do interesse científico em tais materiais, visto que suas propriedades geram enormes campos de aplicação com um ótimo desempenho.

O processo de formação das resinas envolve fatores como tempo e temperatura, uma vez que é necessário que a mistura da resina com o endurecedor seja submetida a temperaturas e tempo de exposição pré-determinados pelos fabricantes para a obtenção do composto termorrígido, esse processo é conhecido como “cura” (CRUZ & SIQUEIRA, 2017).

Situações que devem ser tratadas com cautela ao utilizar resinas são o aparecimento de bolhas na estrutura, que podem ocasionar trincas devido ao acúmulo de pressão no interior rígido do composto, e a observação da temperatura de transição vítrea correta da estrutura epoxídica, pois ao utilizar acima desta temperatura, há perdas das características da resina, com alteração do seu Módulo de Young e, assim, se transformando em um material com menor adesão (CRUZ & SIQUEIRA, 2017).

2.3.1.2 Reforço

A fibra utilizada neste projeto consiste numa associação de fibra de vidro unidirecional com fio de SMA.

A fibra é formada por material filamental e tem o papel no compósito de conferir rigidez e resistência a ruptura (CALLISTER, 2000).

O desempenho mecânico do compósito também está ligado ao fato das fibras serem contínuas ou descontínuas. Elas atuam de formas diferentes; contudo, as duas têm a atribuição de suportar os esforços oriundos da matriz (MATTHEUS & RAWLINGS, 1994).

As fibras podem ser estabelecidas como unidirecionais, quando atuam em uma única direção; bidirecionais, na qual é aplicada em duas orientações ortogonais; ou ainda de forma aleatória ou tridimensional, quando sua orientação é multidirecional (CARLSSON & PIPES 1987).

Existem inúmeras fibras que podem ser aplicadas em materiais compósitos, porém as mais usuais são as de vidro, carbono e aramida, além das que são de origem sintética e natural (DANIEL & ISHAI, 1994).

Utilizando a fibra de vidro associada ao SMA, procura-se obter compósitos que podem modificar sua forma através da aplicação de cargas ou mudanças de temperatura. Devemos basear as escolhas dos tipos de reforços na função que desejamos que o conjunto desempenhe, pois, suas propriedades dependem de outros fatores, como relação de diâmetro e comprimento das fibras, adesão entre matriz e reforço, quantidade de fibras presentes na estrutura, orientação das fibras (NASCIMENTO, 2009).

A Tabela 2.1 mostra um comparativo dos módulos de Young de alguns materiais. Além disso, é possível visualizar que são direcionados a diferentes aplicações, sendo a liga de níquel-titânio mais indicada para utilizações mais variáveis em relação a sua forma geométrica.

Tabela 2.1: Modulo de Young de diversos materiais (ARMSTRONG *et al.*, 2005)

Fibra		Modulo de Young (GPa)
Fio de grafite tipo Hm		414
Fibra de boro		379
Multifio de Kevlar 49		131
Multifio de Vidro S		82,7
Fibra de Nitinol	Austenita	+/- 80
	Martensita	25 a 40

Pesquisas anteriores demonstraram que laminados compósitos formados por vidro e epóxi embutidos em atuadores de Ni-Ti pré-tensionados em 5%, num volume de 13% de SMA, anulam completamente a pós-flambagem térmica em uma determinada faixa de temperatura. Além disso, incorporar atuadores de fio SMA em laminados compósitos híbridos melhora a eficácia ao aumentar as frequências fundamentais e reduzir a amplitude da resposta dinâmica, se compararmos com a rigidez dos laminados compostos híbridos no qual são introduzidas camadas compostas adicionais. Em uma comparação com a temperatura ambiente a frequência fundamental aumentou aproximadamente 5 vezes em uma temperatura de 121°C e diminuiu o a resposta máxima de deslocamento em 6 vezes a uma temperatura de 71°C. (TURNER, 2000)

Em estudos sobre vibrações em placas de compósitos laminados de grafite-epóxi, em altas temperaturas, houve um aumento na rigidez do material que continha fibras de Ni-Ti previamente deformadas. Em baixas temperaturas, a tensão causada pela expansão térmica é suprimida pela tensão de recuperação gerada pela liga de memória de forma. Ao utilizar a liga de Ni-Ti são observados aumento de rigidez do material e aumento da temperatura crítica de flambagem. Para uma fração de 15% de SMA com uma pré-deformação de 3%, a alteração de temperatura em relação ao compósito sem SMA é de 482,34% (KIM *et al.*, 2004).

2.3.1.3 Aderência

Uma preocupação do uso de compósitos é o problema relativo a aderência entre a matriz e o reforço, já que uma baixa adesão entre os fios de SMA e a resina podem causar falhas prematuras. Miramini *et al.* (2015) diz que um dos problemas mais comuns dessa estrutura é o descolamento entre as interfaces da matriz e dos fios de SMA causados por tensões nas superfícies. Ainda afirma que um dos métodos mais utilizados para avaliar tal situação é o teste de pull-out. A adesão pode ocorrer por diversas formas, seja por atração eletrostática, ligações químicas ou no caso mecânico é através das interligações ou “interlocking”. Esse tipo de ligação é efetivo se as forças forem paralelas a interface e baixas caso ocorram de forma perpendicular.

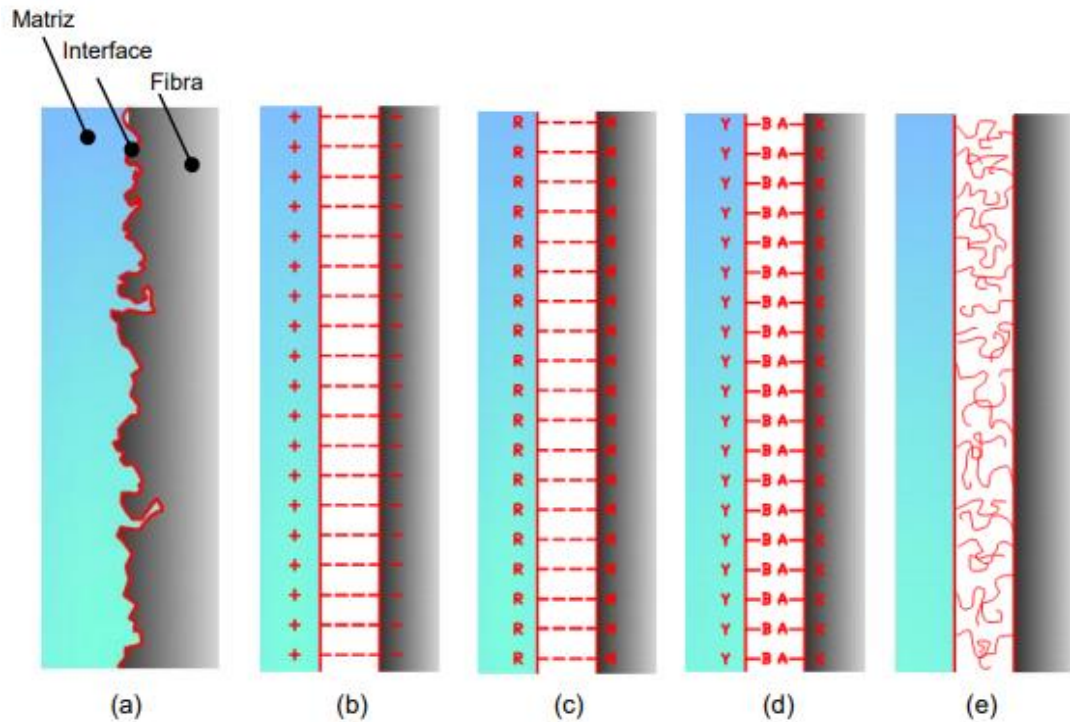


Figura 2.4: Diagrama esquemático dos mecanismos de adesão na interface fibra-matriz. (NOSSA, 2011)

De acordo com a Figura 2.4, (A) adesão mecânica; (b) adesão eletrostática; (c) adesão química em que R e X representam grupos químicos compatíveis; (d) adesão química com aplicação de um agente de acoplamento; (e) adesão por reação ou interdifusão envolvendo polímeros.

Antico *et al* (2012) propõe duas formas de evitar tal problema, sendo um deles a utilização de agentes de recobrimento e a outra uma mudança na geometria do composto, de forma microscópica, para tentar maximizar a interligação entre matriz e reforço. O resultado de tais testes mostrou que a utilização de 5% de ácido conhecido como “phenylphosphonic acid” ou “PPPA” obteve uma força máxima de 28,0N contra 22,2N do material sem tratamento.

2.4 Ligas de Memória de Forma

Existem inúmeros tipos de materiais, alguns apresentam determinadas funções de grande interesse, tanto do ponto de vista científico quanto prático. Tais materiais são chamados de funcionais ou inteligentes. Esses elementos são capazes de realizar determinadas funções ao

receberem algum tipo de estímulo, seja pelo ambiente onde se encontra ou por controle externo (WANG & KANG, 1998).

As ligas de memória de forma pertencem a uma classe de ligas metálicas que possuem a habilidade de sofrer deformações consideráveis, na ordem de aproximadamente 10%, e posteriormente se recuperar sem a ocorrência de deformações plásticas (DELAEY *et al.*, 1974).

Em conjunto a essa característica, apresentam-se transformações de fase na presença de tensões mecânicas e/ou gradientes de temperatura (KRISHNAN *et al.*, 1974). Quando no estado livre de tensões, se apresentam na forma martensítica. (DUEIRIG *et al.*, 1990; FUNAKUBO, 1984; TOUMINEN, 1994)

A capacidade de adaptação destes materiais inteligentes tem contribuído significativamente para o desenvolvimento de diversos tipos de sensores e atuadores (JANOCHA, 1999; GANDHI e THOMSON, 1994; SRINIVASAN e Mc FARLAND, 2001; DOREY & MOORE, 1995).

Devem-se analisar as estruturas cristalinas das ligas de memória de forma com o objetivo de entender o efeito de memória de forma (SMA). Estas ligas contêm pelo menos duas fases claramente diferentes, em que são diretamente proporcionais à mudança de temperatura e à tensão a que são sujeitadas. Conhecida como Martensita, é a fase que surge em temperaturas baixas. Já a Austenita é a fase existente a temperaturas mais altas. As propriedades da liga variam de acordo com a fase predominante. (LA CAVA *et al.*, 2000)

A Austenita possui uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) do tipo B2. Dessa forma, temos um átomo de níquel no centro da estrutura e oito átomos de titânio, um em cada vértice do cubo. Esta forma estrutural é conhecida como fase de origem, por ser simétrica microestruturalmente. A fase martensítica é caracterizada por ter uma estrutura cúbica de face centrada (CFC) do tipo monoclínica B19' e ser microestruturalmente assimétrica. (BRAZ FERNANDES, 2006; OTSUKA e REN, 1999). Na Figura 2.5, é possível observar essas microestruturas.

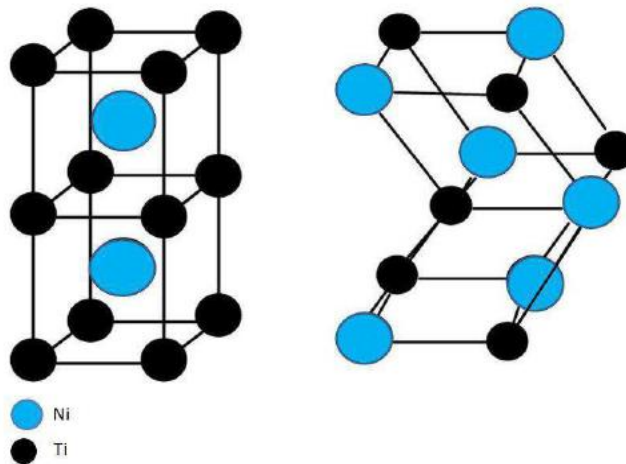


Figura 2.5: Austenita e Martensita (OTSUKA, 1998)

A mudança que acontece na microestrutura martensítica das ligas de memória de forma gera uma Martensita Termoelástica. Essa estrutura é desenvolvida na fase austenítica após ser elevada a altas temperaturas.

É possível observar que entre a fase austenítica e martensítica há a formação de uma fase denominada R, representada pela Figura 2.6. Esta estrutura intermediária (TADAKI *et al.*, 1988) é uma distorção romboédrica da fase Austenita e pode ser detectada através de difração de raios x ou difração de nêutrons. A transformação pode ser de forma direta, onde não é observada a formação da fase R, seja no aquecimento ou no resfriamento da liga. A transformação de fase R assimétrica é a mais comum e acontece somente no resfriamento. Esta pode ser revertida aquecendo a liga acima da transformação de fase da Martensita. Como a fase R não é mais estável que a Austenita, a Martensita se converte totalmente em Austenita. Na transformação de fase R simétrica, pode acontecer tanto no aquecimento como no resfriamento. Neste caso, no resfriamento ocorre uma maior histerese em relação ao aquecimento (SHAW & KYRIAKIDES, 1995).

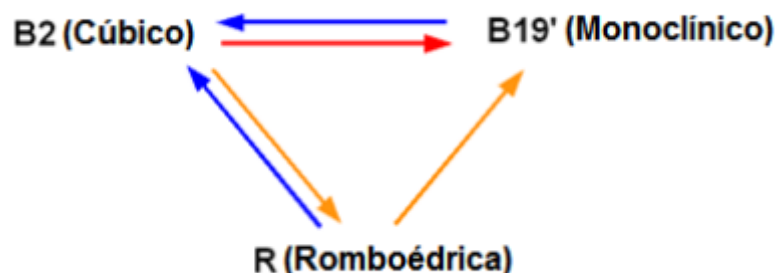


Figura 2.6: Esquema dos dois caminhos de transformação em ligas Ni-Ti (YANG, 2003)

2.4.1 Ligas com Efeito de Memória de Forma

Apesar da liga de Ni-Ti ser a mais utilizada, existem outras ligas que fornecem este efeito. As mais comercializadas, além de Ni-Ti, são as ligas a base de cobre (CuZnAl e CuAlNi) (LA CAVA *et al.*, 2000). Como a liga de Ni-Ti tem uma recuperação superior as ligas à base de cobre (de 8% contra 4% ou 5% nas ligas de cobre), são então mais exploradas. Em benefício, as ligas de Ni-Ti também possuem uma maior estabilidade térmica e são mais resistentes a corrosão. As ligas a base de cobre têm uma maior fragilidade a ruptura por consequência da corrosão por tensão e serem mais dúcteis em relação a liga Ni-Ti. Em contrapartida, as ligas a base de cobre são mais baratas, além de poderem ser fundidas, têm uma maior região de transformação de fase. Ambas possuem vantagens e desvantagens, então deve ser observado para cada aplicação qual é a melhor liga a se utilizar.

2.4.1.1 Ligas de Ni-Ti

Ni-Ti é um tipo de liga de memória de forma na qual seus componentes intermetálicos são equiatômicos. Por conta do intervalo de solubilidade moderada, é possível que exista um excedente de Ni ou de Ti, conferindo certa característica a liga. A solubilidade permite o Ni-Ti se associar a outros elementos conferindo novas propriedades mecânicas e de transformação de fase. Até 1% excedente de Ni é o que mais acontece nesse tipo de adição de elemento de liga. Quanto maior a quantidade de Ni, menor será a temperatura de transformação e maior será a resistência ao escoamento da Austenita. A adição de Ferro (Fe) é comum, assim como o Cromo (Cr) que diminui a temperatura de transformação e o Cobre (Cu) diminui a histerese.

As características da memória de forma podem ser alcançadas através do tratamento térmico recozimento no intervalo de temperatura de 500°C a 800°C e por um período de 10 a 15 minutos para pequenas amostras. Após atingir o completo recozimento, o resfriamento pode ocorrer ao ar, dentro do forno ou em atmosfera inerte e não-oxidante.

As principais propriedades físicas do binário Ni-Ti e algumas propriedades mecânicas importantes da liga na fase recozida são explicitadas na Tabela 2.2. Deve-se, no entanto, observar que tais valores são aproximações, pois variam de acordo com a liga.

Tabela 2.2: Propriedades das ligas binárias com Memória de Forma (LA CAVA et al., 2000)

Temperatura de Fusão	1300°C
Massa Específica	6.45g/cm ³
Resistividade	
Austenita	Aprox. 100 micro-ohms.cm
Martensita	Aprox. 70 micro-ohms.cm
Resistência à corrosão	Semelhante à série 300 de aços inoxidáveis ou ligas de titânio
Módulo de Young	
Austenita	83 GPa
Martensita	28 a 41 GPa
Resistência ao escoamento	
Austenita	195 a 690 MPa
Martensita	70 a 140 MPa
Tensão Última à Tração	895 MPa
Temperatura de Transformação	-200 a 110°C
Calor Latente de Transformação	167 kJ/kg.atom
Deformação de Memória de Forma	Máximo de 8,5%

2.4.1.2 Ligas à base de Cobre

Nestas ligas formadas por três elementos de CuZnAl e CuAlNi, ou composto por quatro elementos associado ao Manganês (Mn). Para refinar os grãos também pode ser adicionado Boro (B), Cobalto (Co), Ferro (Fe), Titânio (Ti), Vanádio (V) ou Zircônio (Zr). As principais propriedades associadas às ligas à base de Cobre podem ser observadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Propriedades das ligas de Memória de Forma à base de Cobre(SMA, 1999)

Propriedades	CuZnAl	CuAlNi
Térmicas		
Temperatura de Fusão	950 a 1020°C	1000 a 1050°C
Massa Específica	7,64 g/cm ³	7,12 g/cm ³
Resistividade	8,5 a 9,7 micro-ohms.cm	11 a 13 micro-ohms.cm
Condutividade Térmica	120 W/m.°C	30 a 73 W/m.°C
Capacidade Calorífica	400 J/kg.°C	373 a 574 J/kg.°C
Mecânicas		
Modulo de Young		
Fase Beta	72 GPa	85 GPa
Martensita	70 GPa	80 GPa
Resistência ao Escoamento		
Fase Beta	350 MPa	400 MPa
Martensita	80 MPa	130 MPa
Tensão Última à Tração	600 MPa	500 a 800 MPa
Memória de Forma		
Temperatura de Transformação	< 120°C	< 200°C
Recuperação de Deformação	4%	4%
Histerese	15 a 25°C	15 20°C

2.4.2 Princípios de Funcionamento

As fases podem mudar quando induzidas a tensões, à temperatura ou ambas. Isso promove a sua deformação e retorno elástico. Estes casos promovem o surgimento de algumas características como a pseudoelasticidade, efeito de memória de forma, comportamento termoelástico e o comportamento de memória de forma reversível. (PAIVA, 2000)

2.4.2.1 Comportamento Termoelástico

Partindo de um ponto inicial, numa amostra de liga Ni-Ti em uma situação livre de tensões e a uma temperatura elevada, o material apresenta uma estrutura austenítica chamada fase matriz. Pode-se observar na Figura 2.7 a representação do comportamento termoelástico.

Ao reduzir a temperatura, a partir do ponto D, há uma mudança na estrutura cristalina ocasionando uma mudança de fase martensítica (trecho AB). O processo de resfriamento continua até total acomodação dos cristais, o qual inicia no ponto A e finaliza no ponto B, na ocorrência de uma martensita estável.

Com o acréscimo de temperatura, no ponto B, ao atingir a temperatura inicial de formação de austenita (ponto C), é possível observar uma mudança de fase, percorrendo o caminho inverso (trecho CD) de forma contínua até atingir a temperatura final de formação austenítica (ponto D). Ao alcançar o ponto D temos uma estrutura austenítica estável (PAIVA, 2000).

É preciso destacar que o comportamento termoelástico dos materiais não é linear, podendo apresentar algumas diferenças em relação ao gráfico padronizado mostrado abaixo.

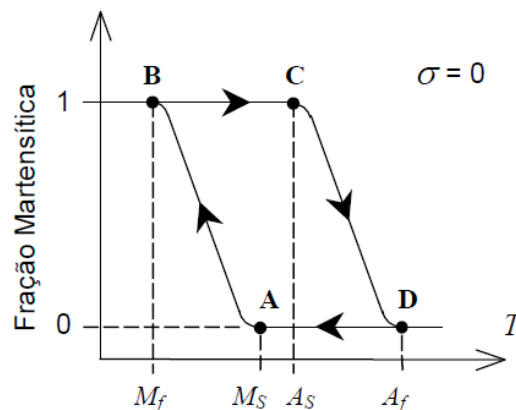


Figura 2.7: Comportamento Termoelástico do Ni-Ti (PAIVA, 2000)

2.4.2.2 Efeito de Memória de Forma

O efeito de memória de forma decorre quando um liga memoriza uma forma pré-determinada, mesmo após diversas deformações (ZHANG *et al.*, 1991; HEBDA e WHITE 1995; ZHANG *et al.*, 1997; GOO e LEXCELLENT, 1997; PRADER e KNEISSL, 1997). A ocorrência deste efeito se manifesta em uma via (*one-way memory shape*) e duas vias (*two-way memory shape*). No primeiro caso, resfria-se a liga abaixo da temperatura de transformação de fase da Martensita ($T < M_f$) e sua forma se mantém a mesma. Então é utilizado um carregamento

para deformar a liga e essa deformação se preserva. A temperatura é elevada e mantida até a recuperação da forma inicial.

Enquanto o efeito de uma via só ocorre no aquecimento da liga, ou seja, na fase austenítica, o efeito de duas vias acontece tanto no resfriamento como no aquecimento da liga. A tensão aplicada e a deformação que acontece nesse tipo de liga é menor que na de uma via. Porém, as forças de restituição no aquecimento são elevadas como nas ligas de memória de forma de uma via.

Examinando uma liga de memória de forma de estrutura martensítica, na qual foi resfriada abaixo da temperatura de transformação de fase martensítica ($T < M_f$), citado anteriormente. Analisando o gráfico da Figura 2.8, compreende-se que ao empregar um carregamento a esta liga, pode se observar a curva com comportamento elástico até a tensão crítica (ponto A). A partir daí a Martensita começa a se reorientar (trecho AB), chegando a sua deformação máxima para o carregamento. No ponto B, a liga manifesta novamente sua característica elástica. Como encontra-se na Austenita estável ($T < A_s$), após o descarregamento há uma pequena recuperação elástica. Uma deformação residual consequente pode ser recuperada aquecendo a liga acima da temperatura de Austenita ($T > A_f$). Sua fase de origem é atingida e então a liga apresenta o efeito de memória de forma. (PAIVA, 2000)

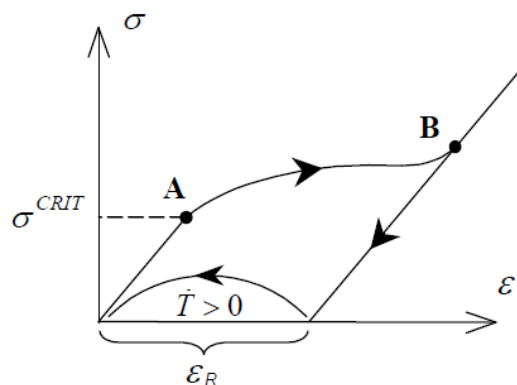


Figura 2.8: Gráfico Tensão x Deformação do Efeito de Memória de Forma do Ni-Ti de uma via (PAIVA, 2000)

O efeito de memória de forma de duas vias precisa passar por um procedimento de treinamento. Assim, cada fase fica associada a uma forma e diretamente proporcional a variação de temperatura. O treinamento pode acontecer de duas maneiras, através do *Shape Memory Effect Cycling* ou por meio da presença de Martensita Não-Maclada (*Stress-Induced Martensite Training*) (ZHANG *et al.*, 1991).

O procedimento de obtenção do *Shape Memory Effect Cycling*, que pode ser observado na Figura 2.9, consiste em reorientar a Martensita utilizando um carregamento que ultrapasse o limite de escoamento σ^{ESC} (ponto A) para uma temperatura constante ($T < M_f$), permanecendo assim tensões residuais. Retira-se o carregamento (ponto B) e aquece a liga acima da Austenita (A_f) no ponto C. Em seguida, o material é resfriado até sua temperatura inicial, no ponto D ($T < M_f$). Conforme o processo é repetido, a Martensita é estimulada a sua reorientação no trecho CD. Este processo garante que, se o material for aquecido ou resfriado, tomará a condição no ponto D. A partir daí ele memoriza uma condição relacionada à Austenita (no ponto C) e atribui uma forma relacionada à Martensita Maclada (ponto D).

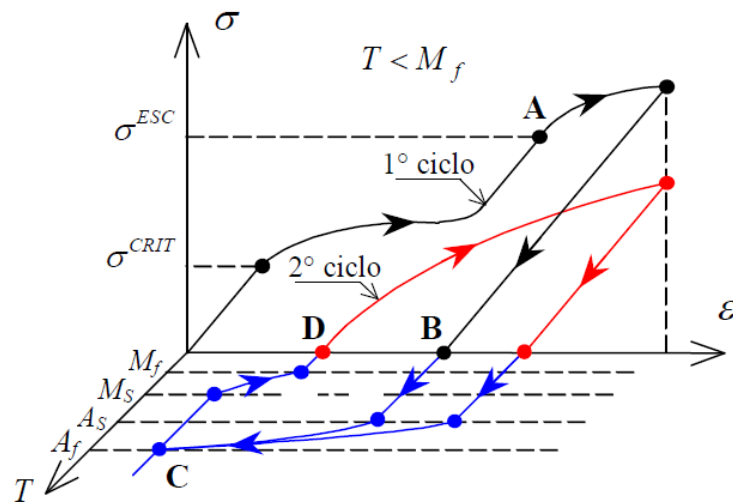


Figura 2.9: Gráfico Tensão x Deformação x Temperatura do Efeito de Memória de Forma do Ni-Ti de duas vias (PAIVA, 2000)

2.4.2.3 Pseudoelasticidade

Uma das formas que também se apresentam é a pseudoelasticidade, também chamada de superelasticidade. Partindo de uma situação na qual se esteja acima da temperatura final de formação da Austenita e ocorra um carregamento que exceda sua tensão crítica, surgirá uma variante martensítica, que ao retirar esse carregamento retornará a sua estrutura austenítica. A diferença em relação aos outros processos é que a superelasticidade é um efeito que acontece em um menor intervalo de temperaturas, logo após a temperatura de transformação. Neste caso,

não é necessário aquecimento para causar a recuperação da forma original e o material exibe enorme elasticidade, podendo obter deformações superiores a 10%.

Contraopondo-se ao efeito da memória de forma, a superelasticidade surge numa composição totalmente austenítica. A transformação de Austenita em Martensita ocorre ao se aplicar uma tensão no material e sua reversão ocorre ao retirar tal tensão, sendo este acontecimento chamado de Martensita Induzida por Tensão.

O gráfico da Figura 2.10 mostra que material reage de forma elástica até atingir sua tensão crítica no ponto A; a partir dessa região, ocorre a transformação da Austenita em Martensita, sendo o ponto B onde se encontra a Martensita induzida por tensão. Ao eliminar a carga atuante, ocorre a transformação inversa, transformando a estrutura martensítica em austenítica, fato observado na região CD. Nessa região, como $T > A_f$, a Martensita é instável quando não houver um campo de tensões atuando.

Devemos observar também que o efeito da pseudoelasticidade é utilizado como uma das formas de treinamento para o efeito memória de forma. Ao retirar uma carga que estava acima da tensão crítica, uma parte da Martensita Não-Maclada não retorna ao estado austenítico e gera uma forma associada a fase matriz. No processo de resfriamento, para $T < M_f$, o material adquire uma nova forma associada a Martensita Maclada, sendo possível o controle dos dois tipos pelo aquecimento e resfriamento correto do material (PAIVA, 2000).

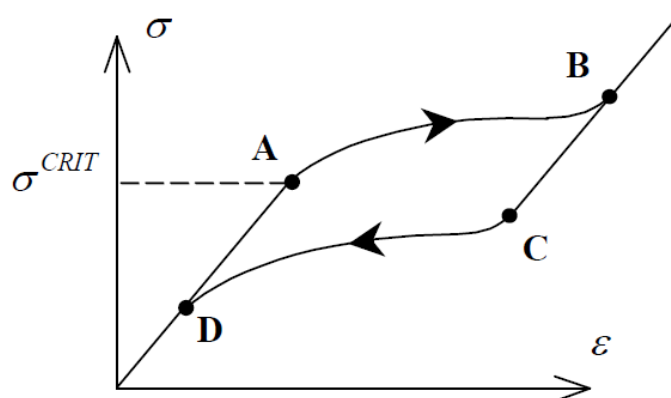


Figura 2.10: Gráfico Tensão x Deformação do Comportamento Pseudoelástico (PAIVA, 2000)

2.4.3 Aplicações

Como mencionado anteriormente, as ligas de memória de forma comerciais são largamente utilizadas em uma série de segmentos por conta de suas propriedades. A seguir serão expostos alguns exemplos de aplicação deste tipo de liga.

2.4.3.1 Engenharia

Na área Mecânica e Civil, as ligas de memória de forma podem atuar com a função de controle estático e vibracional por meio da utilização de fios de liga, normalmente imersos em um material compósito. (TAKEDA *et al.*, 1986; FULLER *et al.*, 1989; ROGERS *et al.*, 1990, 1991a; DUERIG *et al.*, 1990; ANDERS *et al.*, 1992; BAZ *et al.*, 1990,1993)

Podemos utilizar fios de NiTi na produção de compósitos para efetuar controle de vibração. Foi desenvolvido um absorvedor de vibrações adaptativo passivo com ligas de memória de forma, com a capacidade de modificar a rigidez do material através de alterações na sua temperatura. Essa característica permite uma diminuição das vibrações da estrutura utilizando somente uma alteração na temperatura da liga de memória de forma. (WILLIANS *et al.*, 2002)

É possível também a utilização de SMA em estruturas, tais como pontes, introduzidas em compósitos que modificarão a rigidez da mesma, proporcionando um maior amortecimento. Novamente nesse caso, utiliza-se a mudança de temperatura da liga para proporcionar tal efeito. (FERNANDES, 2006)

Monitoramento das condições estruturais: Qiu *et al.* fizeram testes com diferentes fibras de SMA embutidos em compósitos de resina e fibra de vidro, na qual o monitoramento dos SMA's ajudaria na análise das localizações de carregamentos ou possíveis danos.

Minimização de danos: O uso de ligas de memória de forma, com o intuito de minimizar os danos causados por impactos, tem um histórico de pesquisa com bases sólidas (PAINE *et al.*, 1994). Pappadà *et al.* observaram a possibilidade de utilizar fios de NiTi como pontos iniciais de danos. Ao medir a energia dissipada e o pico de carregamento em um compósito de matriz polimérica com fios de NiTi em diferentes cargas, observou-se uma melhoria de alto

nível, sendo um aumento superior a 100% de dissipação de energia num teste de alto impacto. (AURREKOETXEA *et al.*, 2011, PINTO *et al.*, 2014).

O uso de compósitos com fibras de carbono reforçados por SMA apresentou uma diminuição da área danificada em observações em ensaios não destrutivos (PAPPADÀ *et al.*, 2014). Tal atuação foi previamente analisada por Khalili *et al.*, no qual uma amostra apresentou melhor desempenho em situações de impacto e tração quando utilizado os reforços de SMA.

2.4.3.2 Ortodontia

É possível observar na ortodontia o emprego de ligas de memória de forma em aparelhos ortodônticos, responsáveis pela correção dentária. Neste método, o arame de SMA é deformado no formato correto da arcada e empregado ao paciente. Quando em temperatura ambiente, o fio é bastante deformável, já na boca do paciente a temperatura corporal é de aproximadamente 36,5°C, assim a liga é aquecida e começa a gerar tensão. Através da pseudoelasticidade, o fio age com uma pequena tensão de recuperação da deformação sob os dentes. O fio desempenha uma tensão constante e de intensidade apropriada sobre os dentes e isso permite que o paciente não precise voltar ao dentista com tanta frequência. Assim, o resultado é mais satisfatório que nos aparelhos comuns. Um exemplo desta aplicação se encontra na Figura 2.11, a seguir. (AIROLDI *et al.*, 1995; AIROLDI & RIVA, 1996; AIROLDI *et al.*, 1997; RABOUD, 1998 e SACHDEVA & MIYAZAKI 1990)



Figura 2.11: Fios ortodônticos de SMA. Fonte: imgrum.org

2.4.3.3 Medicina

Por conta do efeito da pseudoelasticidade, a medicina tem desenvolvido dispositivos que utilizam esta propriedade.

Guidewires, como o exemplo da Figura 2.12, são guias metálicas, finas e longas que, inseridas em incisões ou vasos, possuem a função de orientar e chegar até áreas lesionadas. São dispositivos seguros e rápidos na hora da obtenção de diagnósticos. As guias dispõem de propriedades como a capacidade de pressão, direção, torque e opacidade. A capacidade de pressão é quantidade de força necessária para o fio avançar. Sua capacidade de orientação corresponde a resposta da ponta do fio para navegar pelos vasos. O torque permite o fio ser girado pelo operador sem perder suas características. E a opacidade possibilita um maior nível de visibilidade sob imagem fluoroscópica (STICE, 1990).

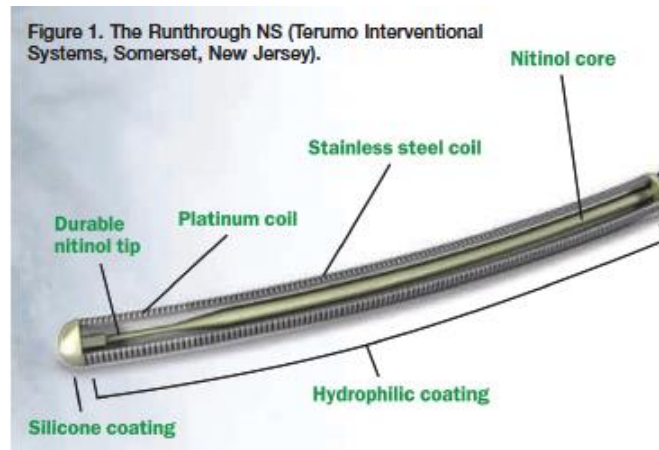


Figura 2.12: Guidewire de SMA. Fonte: *Terumo Interventional Systems*

Há também um estudo para microestruturas auto expansíveis. Este dispositivo pode desobstruir vasos por consequência da deformação da liga. Seu raio pode expandir até duas vezes o tamanho do seu diâmetro contra as paredes internas dos vasos, atuando com força constante e intensidade adequada. Verificado através da ilustração da Figura 2.13 (MELZER e STÖKEL, 1994).

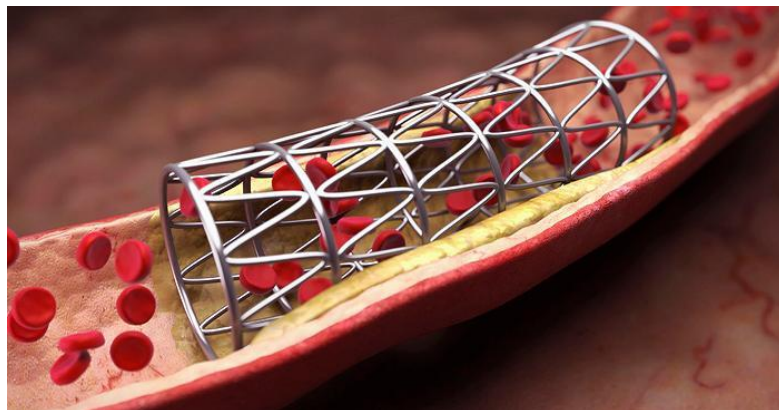


Figura 2.13: Microestrutura auto expansível de SMA. Fonte: domtotal.com

2.4.3.4 Aeroespacial

Ilustrado pela Figura 2.14, verificamos que com o intuito de evitar o uso de pirotecnia, a indústria aeroespacial desenvolveu um dispositivo de separação que é muito usual em abertura de painel solar de satélites e separação de balões meteorológicos (ANDERS e ROGERS, 1991; PACHECO e SAVI, 1997 e VERRI NUNES *et al.*, 1999). O equipamento é formado por

parafusos entalhados envolvidos por um anel de memória de forma. Conforme o material se dilata, o parafuso se rompe e assim os componentes se separam.

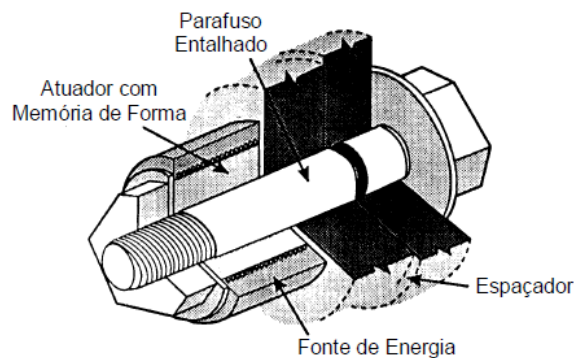


Figura 2.14: Dispositivo de liberação de painéis solares de satélites (BUSCH *et al.*, 1992).

2.4.3.5 Segurança

Sprinklers, dispositivos contrafogo e queimaduras são exemplos onde encontra-se ligas de memória de forma. Em mecanismos contra queimadura, é possível observar válvulas de temperatura. A válvula tem o comportamento de reduzir o fluxo de água quando alcança temperaturas elevadas para a sensibilidade humana, ou seja, acima dos 49°C. Conforme a temperatura diminui, o escoamento retorna ao fluxo normal (LA CAVA *et al.*, 2000).

2.4.3.6 Tubulações

Outra forma de utilização é em tubulações para acoplamentos, são estruturas baseadas no efeito unidirecional da liga de memória de forma. A aplicação de uso mais comum é em acoplamentos de tubos sem costura, sendo um dos componentes usado em alta temperatura e com diâmetro um pouco menor que dos outros tubos. Posteriormente o acoplamento é resfriado até a fase martensítica, geralmente com nitrogênio líquido, e tem suas dimensões expandidas

num valor maior que o diâmetro externo dos tubos. Ao inserir os tubos no acoplamento resfriado e ao longo de sua utilização ele aquecer até atingir a temperatura de operação, o acoplamento encolherá até o diâmetro inferior ao dos tubos proporcionando uma junção extremamente forte, inclusive em situações de altas vibrações. Isso pode ser observado na Figura 2.15, a seguir (SAN JUAN, 2006).

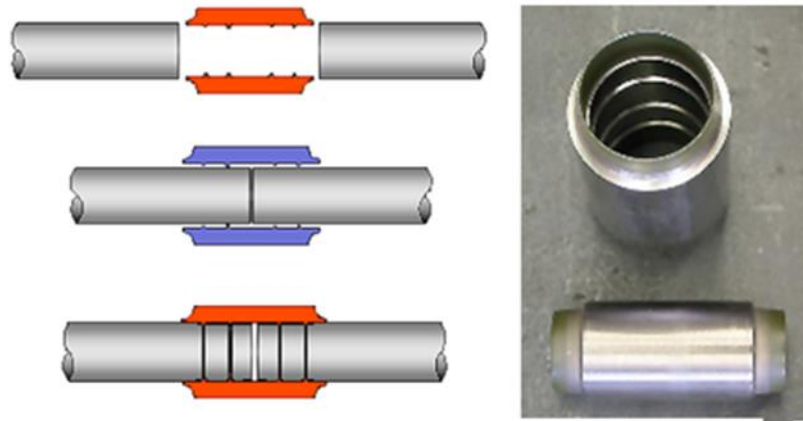


Figura 2.15: Representação do acoplamento e foto de um acoplamento CryoFit®

2.4.3.7 Concretos inteligentes

Dentre diversas aplicações, pode ser observada a utilização dos concretos estruturais inteligentes preparados para suportar explosões e desastres naturais, como terrorismo e atividades sísmicas (MO, 2004). O Nitinol interage com o concreto, evitando, assim, a propagação da energia resultante de tais atividades e impedindo ou minimizando os danos (BONCI *et al.*, 2001). Tais usos são presentes na Basílica de São Francisco de Assis e na torre da Igreja de São Giorgio, ambas na Itália, que passaram por restaurações após terremotos no fim do século XX.

2.5 Materiais Compósitos Inteligentes

Anteriormente já foi mencionado o que são as ligas de memória de forma, neste tópico será apresentada uma outra estrutura associada a esse tipo de material, o compósito inteligente.

A diferença mais notável entre o compósito e o compósito inteligente, é que ao invés do foco exclusivo em questões estruturais do elemento, como leveza e flexibilidade por exemplo, o compósito inteligente possui uma capacidade de se adaptar a transformações através de alterações de temperatura e força (JIANG & BATRA, 2001).

Estes tipos de compósitos recebem reforços de ligas de memória de forma, que proporcionam boas características mecânica como taxa de recuperação significativa do elemento, alta capacidade de deformação, baixo peso (YANG *et al.*, 2006)

São materiais com alto potencial de uso em diversas situações, tanto como atuadores e sensores como em estruturas de prédios e pontes para evitar danos causados por impactos e tremores (ASUNDI, 1999; UMEZAKI, 2006).

2.5.1 Materiais Compósitos Híbridos (SMAHC)

O SMA, nessa situação, tem a função de controle de forma e vibracional (ZAK *et al.*, 2005). Assim surgiu o termo SMAHC (*Shape Memory Alloy Hybrid Composite*) cuja tradução é Compósito Híbrido de Liga de Memória de Forma (MATTHEUS e RAWLINGS, 1994).

O SMAHC é produzido impregnando o fio de SMA em matriz compósita, como mostrado na Figura 2.16. O fio pode ser treinado previamente pré-deformados para controle de forma, ou sem deformação, para controle da rigidez da matriz compósita (OTSUKA e WAYMAN, 1998).

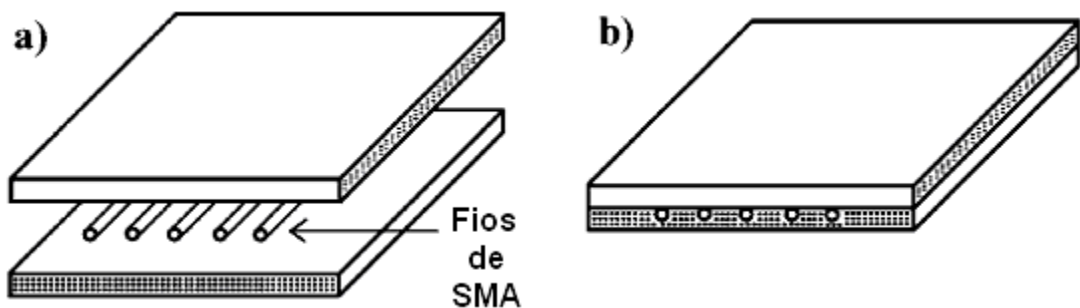


Figura 2.16: Demonstração da fabricação do SMAHC. (CASTILHO, 2008)

A pesquisa desse material ainda é recente, porém crescente no meio acadêmico, pois existe um grande potencial de aplicações. O comportamento cíclico térmico do SMAHC ainda é pouco conhecido (ZHENG *et. al.*, 2005), por isso, ainda há uma limitação no seu emprego.

2.5.1.1 Aplicações

Aqui serão abordados alguns exemplos de funções exercidas pelos materiais compósitos inteligentes.

2.5.1.1.1 Robótica

A Figura 2.17 ilustra um estudo a respeito da flexão de um material polimérico reforçado por fibra de vidro (*Glass Fiber Reinforced Polymer - GFRP*) associado ao SMA para produzir o deslocamento de um robô lesma. O fio de SMA foi acoplado à estrutura compósita no formato de U e ele atua alterando o raio de curvatura do compósito para executar o movimento. Este mesmo mecanismo pode ser aplicado em estruturas robóticas simples, equipamentos biomédicos e em motores de avião. (KIM *et al.*, 2011)

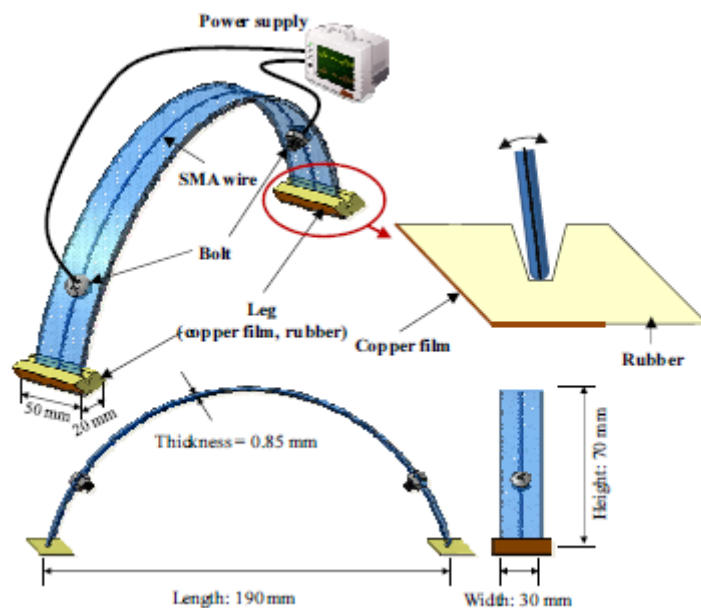


Figura 2.17: Diagrama esquemático do robô lesma. (KIM *et al.*, 2011)

Outro tipo de estrutura semelhante é estudado por Jin *et al.* (2016), onde é utilizado em formato de garra mecânica. A Figura 2.18 mostra alguns módulos robóticos, as chamadas Estruturas Modulares Inteligentes (*Smart Modular Structures - SMS*). Essas estruturas podem ser modificadas para efetuar diferentes tipos de atuações, seja para pegar pequenos e frágeis objetos ou para efetuar deslocamentos de um ponto ao outro. Para a fabricação dos módulos foi utilizada como matriz a polydimethylsiloxane (PDMS) na composição do corpo mole/macio do módulo e o policloreto de vinila (PVC) nas placas dos módulos.

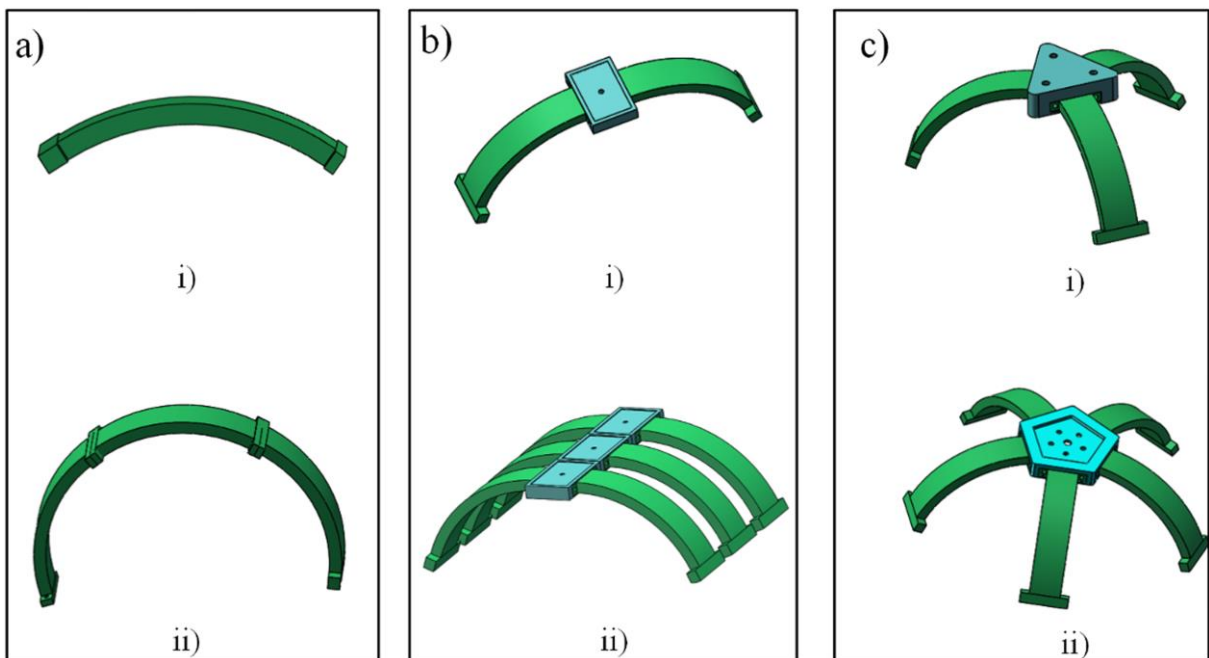


Figura 2.18: Módulos robóticos de SMAHC (JIN *et al.*, 2016).

2.5.1.1.2 Atuador

Outro tipo de utilização de compósitos inteligentes pode ser encontrado na forma de atuador na área automobilística, estruturas articuladas desmontáveis e asas de avião. A Figura 2.19 mostra o projeto de Rodrigue *et al.* (2017), que visa a utilização de estruturas robóticas mais leves e flexíveis ao invés de robôs tradicionais com estruturas rígidas. Nesse projeto foi utilizada uma matriz de polydimethylsiloxane (PDMS) reforçada por uma camada de fibra de vidro e fios de NiTiinol. A matriz utilizada foi escolhida devido a sua faixa de temperatura de

utilização permitir trabalhar tanto com o SMA quanto manter sua alta capacidade de deformação. Atuadores curvos geram maior ângulo de flexão comparativamente a atuadores planos com a mesma seção quadrada, podendo, dessa forma, ter a função de produzir uma maior força de elevação.

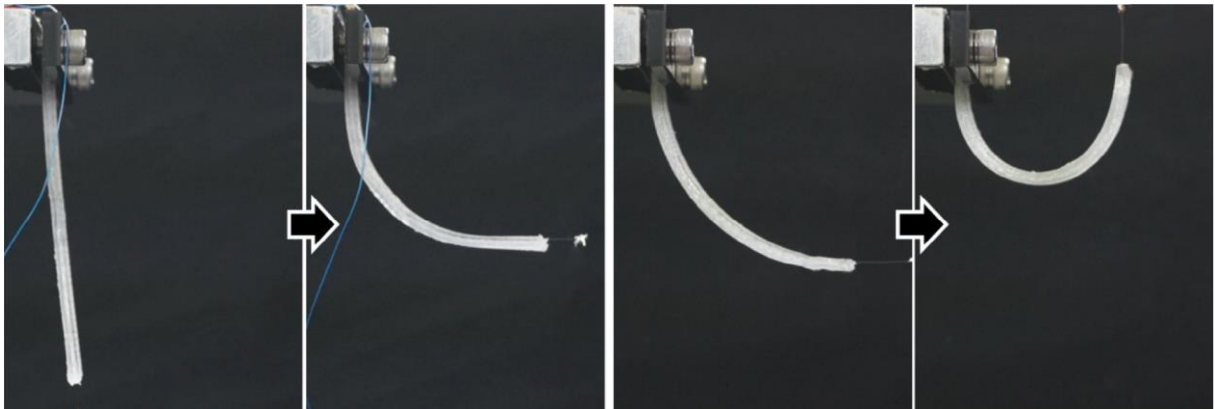


Figura 2.19: Atuador de SMAHC sofrendo deformação pela aplicação de corrente elétrica (RODRIGUE *et al.* 2017).

3 Metodologia

Neste capítulo, serão apresentadas todas as etapas da parte experimental do projeto, começando pela discussão sobre como definir o molde e as alterações efetuadas no projeto após verificar que o modelo não atendia de forma satisfatória às necessidades do trabalho. Será apresentado também o conjunto da resina e do endurecedor utilizados e suas especificidades, além do fio de SMA utilizado para o experimento.

3.1 Fabricação do molde

O processo de fabricação do molde visa a facilitar a aplicação em larga escala, obter resultados iguais para comparação e simplificar o manuseio em todo o procedimento. Com isso em mente, foi tomado como base a prensa que foi utilizada no processo de cura da resina. Como ela tem um limite dimensional, o molde não poderia ser maior que 300 mm x 300 mm. Visto isso, o material disponibilizado foi uma chapa de liga de alumínio que possuía uma espessura de 8 mm e uma chapa de mesmo material, porém com espessura de 0,5 mm. Por meio de uma guilhotina, foram cortadas uma chapa de 300 mm x 200 mm, quatro chapas de 140 mm x 30 mm e quatro chapas de 300 mm x 30 mm. Pode ser observado o corte das chapas na Figura 3.1.



Figura 3.1: Corte das chapas através da guilhotina

Todas as chapas utilizadas tinham a espessura de 8 mm. O molde possui uma exigência de que o fio esteja no meio da resina e que se mantenha tensionado durante o desenvolvimento da cura. Portanto, para que o fio permanecesse estático e para que a remoção do molde fosse facilitada, a ideia foi que a fixação das chapas fosse através de parafusos. A ideia inicial seria que os fios fossem colocados entre as chapas superiores de 140 mm x 30 mm e centrais, possibilitando assim que o fio ficasse na região central. Há uma limitação de espessura. Por isso, a chapa foi rosqueada com um macho com o objetivo de que não fosse necessária a utilização de porcas de fixação.

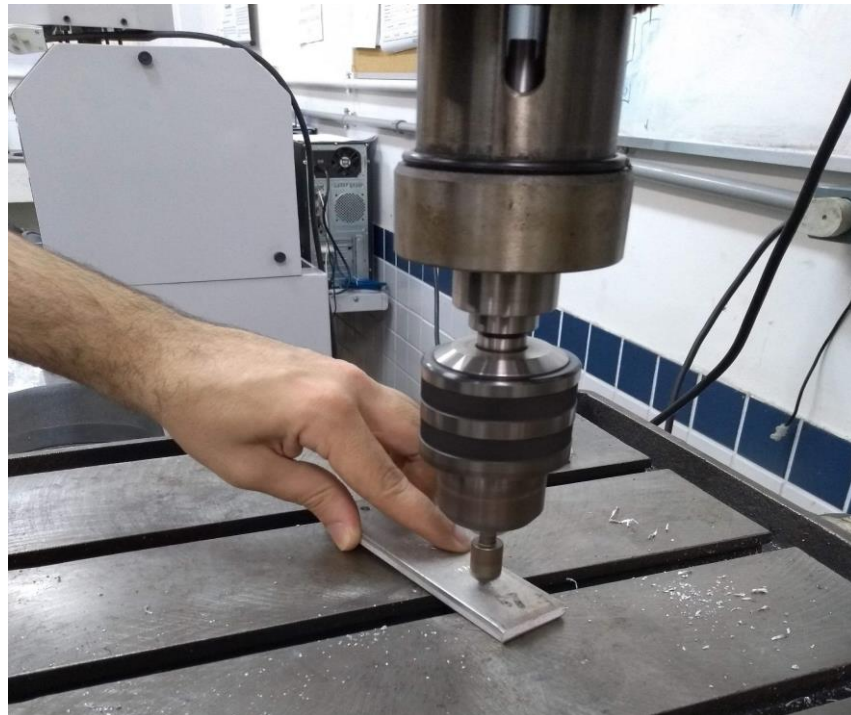


Figura 3.2: Processo de furação das chapas para confecção do molde.

Como visto na Figura 3.2, foi usada uma furadeira de bancada de modelo FSC 32P para realizar os furos necessários para unir as chapas. A broca usada foi a 3,5, o macho 3/16 NC e parafusos 3/16 BWS. Com este molde da Figura 3.3 é possível produzir 6 corpos de prova de uma única vez.

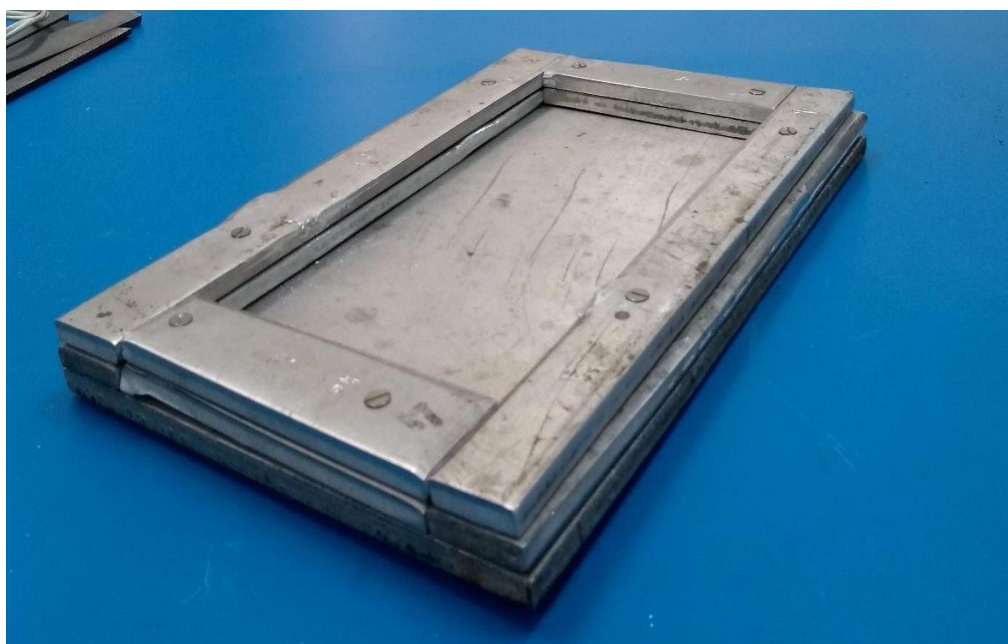


Figura 3.3: Primeiro modelo de molde proposto.

Dois fatores fizeram alterar o modelo do molde. O corpo de prova possui uma exigência de 2 mm de espessura e, como o molde superaria esse valor, foi necessário abrir mão deste projeto, utilizar somente a base de 300 mm x 200 mm e cortar novamente na guilhotina oito chapas de 14 cm x 3 cm, além de oito 300mm x 30 mm, porém com a espessura de 0,5 mm. O novo molde proposto foi fixado através da resina Epóxi. Portanto, todas as peças foram lixadas de ambos os lados para melhorar a aderência da cola entre as chapas. A Figura 3.4 mostra o molde após o lixamento.

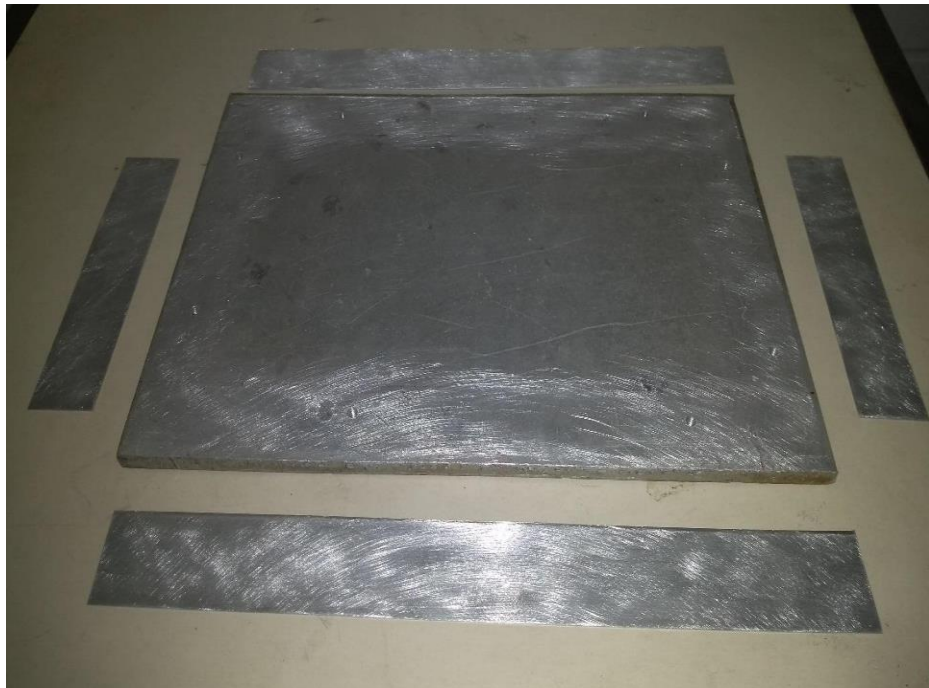


Figura 3.4: Processo de lixamento e limpeza para aplicação de resina no novo molde.

Como mostrado na Figura 3.5, utilizaram-se a resina Epóxi AR-260 e o endurecedor foi o AH-260. A relação entre resina e endurecedor foi de 100/26 e o tempo de cura utilizado foi de 7 dias em temperatura ambiente, de acordo com o fabricante.

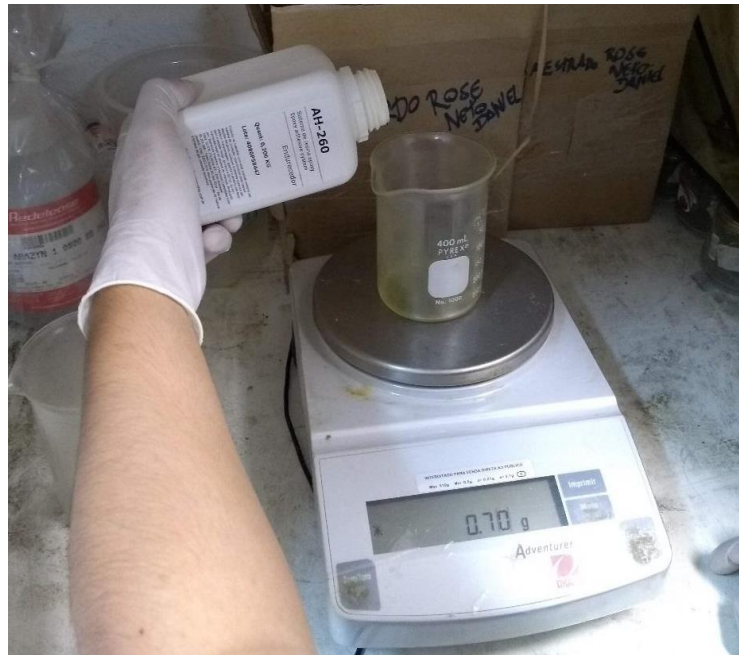


Figura 3.5: Pesagem e processo de mistura da resina AR-260 e o endurecedor AH-260

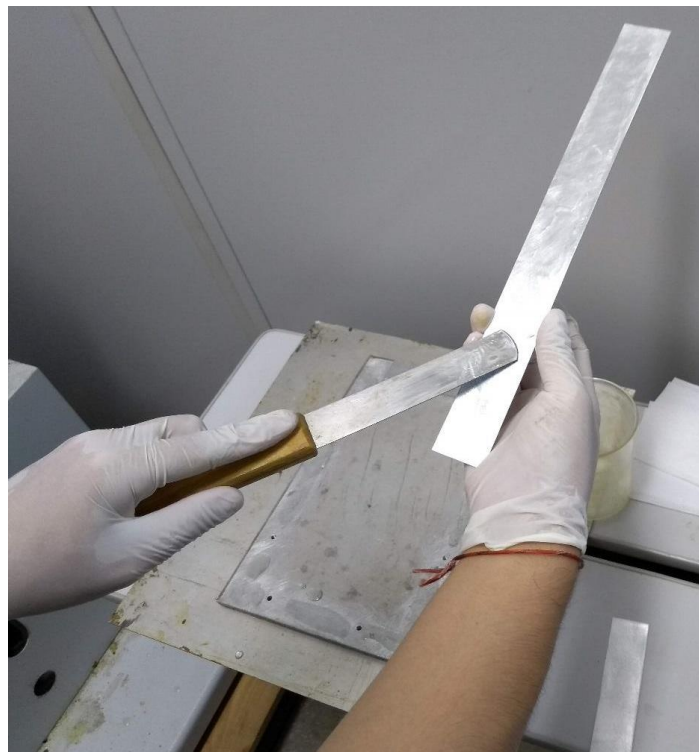


Figura 3.6: Aplicação da resina nas chapas cortadas.

Na Figura 3.6, pode-se observar a aplicação da resina as chapas. Após a aplicação da primeira camada de resina e chapa, foi colocada uma chapa pesada, de forma que pressionasse

as chapas contra a base e, assim, mantivesse uniforme a posição durante a cura. Esse processo pode ser verificado na Figura 3.7, a seguir.



Figura 3.7: Aplicação de chapa pesada.

Após uma semana do endurecimento da primeira sessão de chapas, foi colocada a segunda camada de chapas. Foram respeitados os mesmos pré-requisitos e ambiente; assim, todo o processo seguiu uniformemente. As outras duas camadas de chapas foram fixadas diretamente na tampa. Isso facilitou o manuseio do fio e o posicionamento centralizado, conforme pretendido anteriormente. Dessa forma, foi aplicada a tensão desejada ao fio e viabilizou-se a retirada do corpo de prova do molde.

A prensa hidráulica, na Figura 3.8, foi utilizada no projeto com o objetivo de minimizar ao máximo as imperfeições do molde, considerando que o material utilizado não era recém-fabricado e possuía alguns desníveis. Além disso, pelo fato das chapas terem sido fixadas em camadas acima da placa base, ao utilizar a prensa foi possível nivelar todas as chapas e garantir que estivessem uniformemente aderidas entre si. Outro fator relevante em relação a uso do equipamento é possibilitar uma distribuição uniforme da resina utilizada, pois a irregularidade na distribuição ocasionaria em falhas no projeto.



Figura 3.8: Utilização da prensa hidráulica para produção do corpo de prova (C.P.)

O modelo da prensa utilizada no projeto foi a Prensa Hidráulica com Aquecimento SL – 12/20, da SOLAB. A Tabela 3.1 informa a capacidade e dimensão externa do equipamento.

Tabela 3.1: Propriedades das ligas binárias com Memória de Forma

Modelo	Capacidade	Dimensão Externa
SL-12/20	0 a 20 Toneladas	L=450 x P=420 x A=800

3.2 Materiais e Métodos

Neste capítulo serão abordados separadamente os elementos que fazem parte do material compósito e como se chegou ao produto final para aplicar o experimento.

3.2.1 Fio de SMA

O fio utilizado para este projeto foi o FLEXINOL® *Actuador Wire*, do fabricante DYNALLOY, Inc. Este fio pode ser utilizado como atuador para tensões de até 172 MPa, de acordo com as especificações no site do fabricante. Além disso, é disponível na Tabela 3.2 outras características do fio.

Tabela 3.2: Ficha Técnica do Fio de SMA FLEXINOL® *Actuador Wire*

Liga	Níquel-Titânio
Diâmetro (mm)	0,50
Força Nominal (N)	34,92
Densidade (g/cm³)	6,45
Força de Resfriamento (N)	13,97
Calor Especifico (cal/g × °C)	0,2
Calor Latente (cal/g)	5,78
Condutividade Térmica (W/cm × °C)	0,18
Coefficiente de Expansão Térmica (10⁻⁶/°C)	Martensita: 6,60 Austenita: 11,0
Coefficiente de Poisson	0,33
Resistividade Elétrica (μΩ × cm)	Martensita: 80,0 Austenita: 100,0
Corrente para 1 segundo de contração (mA)	4.000,0

O gráfico da Figura 3.9 a seguir é também encontrado nas especificações do site do fabricante. Neste gráfico Temperatura x Deformação, pode-se perceber que a temperatura de fase austenítica varia entre 70°C e 90°C para uma tensão constante de 172MPa.

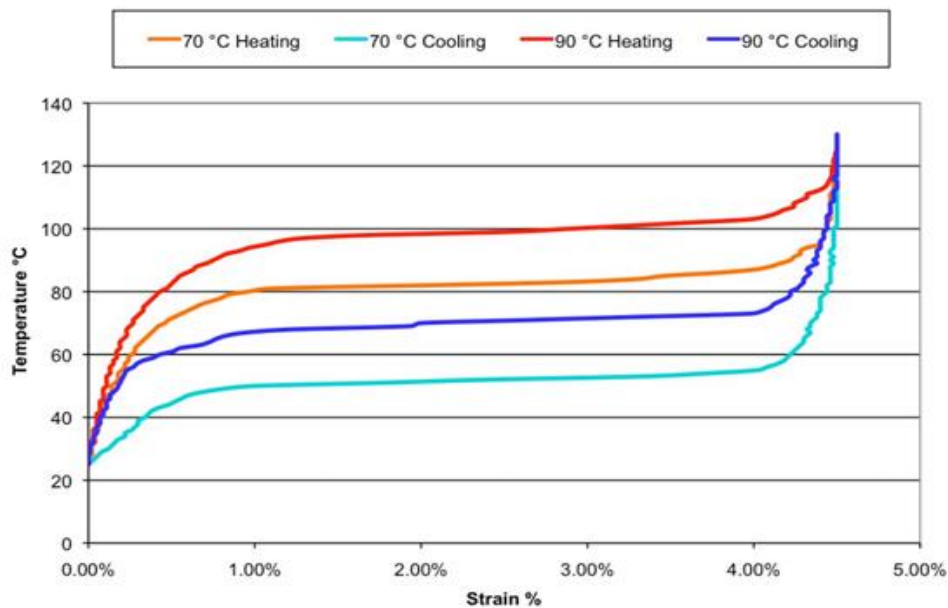


Figura 3.9: Gráfico Temperatura x Deformação do fio de SMA.

3.2.2 Treinamento do Fio de SMA

O fio de SMA utilizado necessitava passar por um treinamento para memorizar o formato desejado para utilização no experimento. Cortaram-se 3 amostras do fio com tamanho aproximado de 300 mm cada e com um diâmetro de 0,5 mm. Na Figura 3.10 o fio foi fixado em uma das extremidades numa morsa e na extremidade livre aplicou-se uma massa de 6kg. Ao finalizar esse arranjo, o fio foi conectado ao aparelho da marca Toellner, que foi responsável pela passagem da corrente elétrica que geraria o calor necessário para o treinamento do fio, foi utilizada uma intensidade de corrente de 2A e uma potência gerada de aproximadamente 7W.

Para esse procedimento AZEVEDO (2016) discorre sobre o treinamento do fio de SMA com diferentes cargas mecânicas e corrente elétrica, sendo as maiores eficiências na recuperação da deformação quando utilizadas baixas cargas mecânicas. Durante o treinamento, ao realizar medições antes e depois da introdução de corrente elétrica, verificou-se que o fio teve o comportamento esperado, apresentando uma variação no comprimento da ordem de aproximada de 8% do seu comprimento, com a devida recuperação ao tamanho inicial ao passar a corrente elétrica nele. Para completar esse preparo da liga de memória de forma, o

procedimento foi realizado em 10 ciclos de 30 segundos para o aquecimento e para o resfriamento do mesmo, sendo repetido em cada um dos 3 fios.



Figura 3.10: Montagem para treinamento do fio de SMA

3.2.3 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

O teste de Calorimetria Diferencial de Varredura (*Differential Scanning Calorimetry* – DSC) tem o objetivo de identificar as temperaturas inicial e final de transformação de fase martensítica para austenítica da liga de memória de forma. Este teste foi realizado no Centro de Mecânica Não-Linear da COPPE/POLI (Mecanon) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e foi utilizado o equipamento Netzsch DSC 200 F3. A Tabela 3.3 mostra os parâmetros utilizados no teste. Os resultados obtidos e utilizados no presente projeto foram retirados de um trabalho anterior realizado no CEFET/RJ, no qual o fio utilizado em ambos os trabalhos é do mesmo lote e, portanto, possuem as mesmas características.

Tabela 3.3: Parâmetros do ensaio D.S.C. do fio de SMA (SILVEIRA & CHERMONT, 2017)

Parâmetros	Valor
Massa da amostra (mg)	9,80
Massa do cadinho (mg)	39,4
Faixa de temperaturas (°C)	-20 – 140
Taxa de aquecimento/resfriamento (K/min)	10,0

Mediante a Figura 3.11, é possível analisar na parte superior do gráfico que, a partir da temperatura de $T_{As} = 58,9^{\circ}\text{C}$, inicia-se a transformação de fase austenítica e o fim da transformação se dá com $T_{Af} = 76,4^{\circ}\text{C}$. Já as temperaturas inicial e final de transformação de fase martensíticas podem ser observadas na parte inferior do gráfico, onde a inicial é $T_{Ms} = 41^{\circ}\text{C}$ e a final encontra-se a $T_{Mf} = -8^{\circ}\text{C}$. Considerando ainda a parte inferior do gráfico, notam-se as temperaturas de transformação de fase referente a fase R, na qual começa a uma temperatura de $T_{Rs} = 71,8^{\circ}\text{C}$ e finaliza a uma temperatura de $T_{Rf} = 49,6^{\circ}\text{C}$.

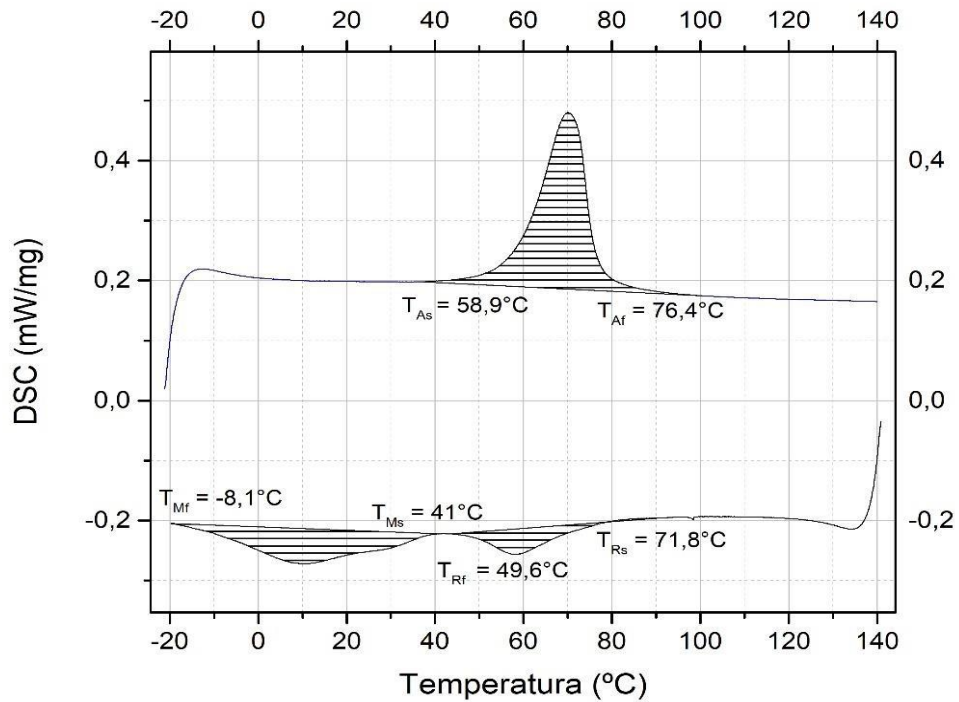


Figura 3.11: Ensaio DSC do fio FLEXINOL[®] (SILVEIRA e CHERMONT, 2017)

3.2.4 Ensaio de Tração do Fio

O propósito deste ensaio é a caracterização do fio de SMA para verificação das propriedades após o treinamento. A Figura 3.12, a seguir mostra o ensaio que foi realizado no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES) no Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ) e a máquina utilizada para o ensaio de tração foi a Instron com uma célula de carga de 10kN acoplada. Neste experimento, há a aplicação de uma carga uniaxial crescente no fio, ao passo que são registradas as variações de comprimento. O ensaio aconteceu a temperatura ambiente e a uma velocidade de deslocamento de 0,8 mm/mim.

A deformação máxima foi de aproximadamente 5,5 % e, assim, foram calculadas a tensão e a deformação, para assim gerar os gráficos.



Figura 3.12: Caracterização do fio de SMA com $\varnothing 0,5\text{mm}$ – Ensaio de tração.

Na Figura 3.13, verifica-se que a curva apresenta um comportamento crescente até aproximadamente 30 MPa, onde se inicia a fase de transformação martensítica. A fase martensítica atinge seu final com uma deformação de aproximadamente 2,15 %. A verificação

ocorreu até cerca de 300 MPa, quando houve o seu descarregamento a fim de preservar as características do fio e não atingir o seu escoamento.

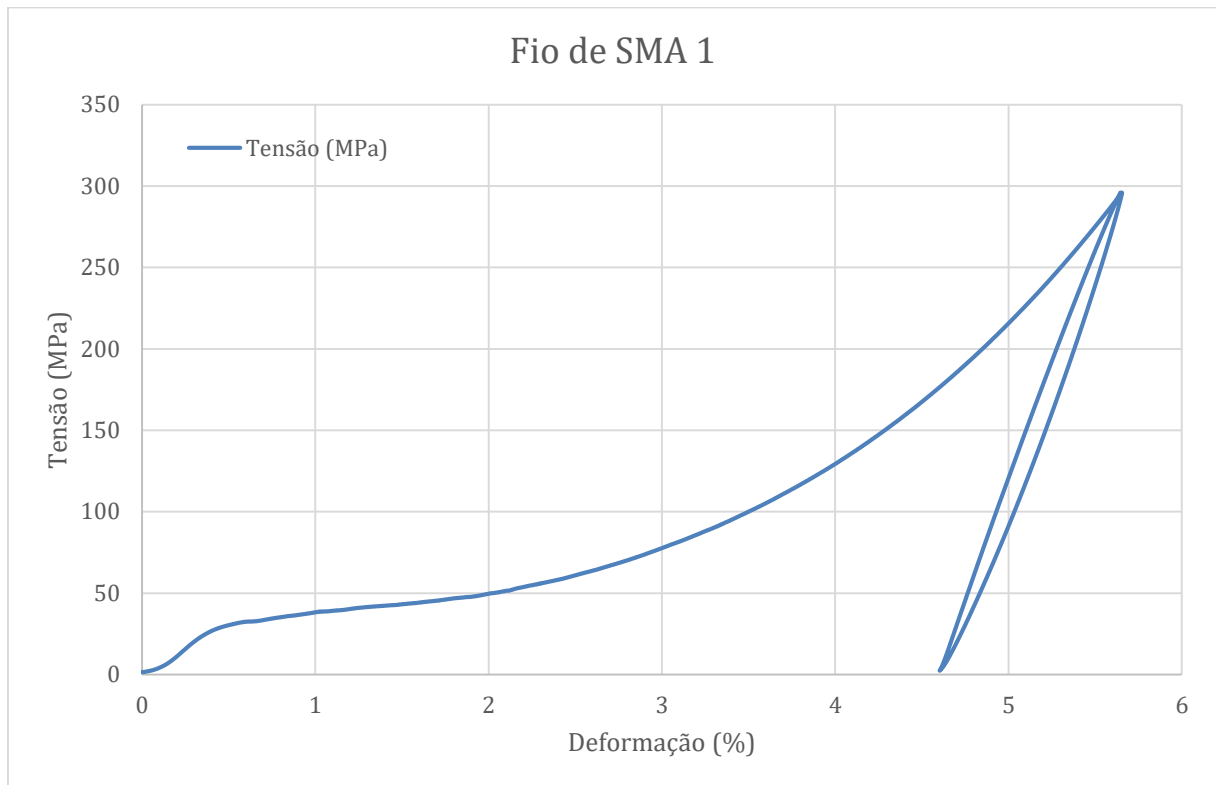


Figura 3.13: Gráfico Tensão x Deformação - Fio de SMA 1 com \varnothing 0,5mm.

Os critérios estabelecidos no primeiro ensaio foram repetidos para todos os fios, assim, não houve mudança significativa, visto que os fios foram caracterizados com o mesmo padrão. A única diferença observada nos gráficos gerados foram as variações de deformação do fio comparativamente. Isso se deu pelo fato de, no momento da operação de acoplamento do fio na máquina, o operador gerou pré-tensões diferentes nos fios, o que acarretou em variações diferentes de deformação.

A Figura 3.14 apresenta um início de transformação de fase martensítica em cerca de 30 MPa. Com isso, a fase final da transformação martensítica aconteceu com uma deformação em torno de 1,20 %. Assim como no primeiro ensaio, a carga máxima aplicada foi de 300 MPa com o intuito de manter as propriedades do material e não ocasionar a sua deformação plástica ou ruptura.

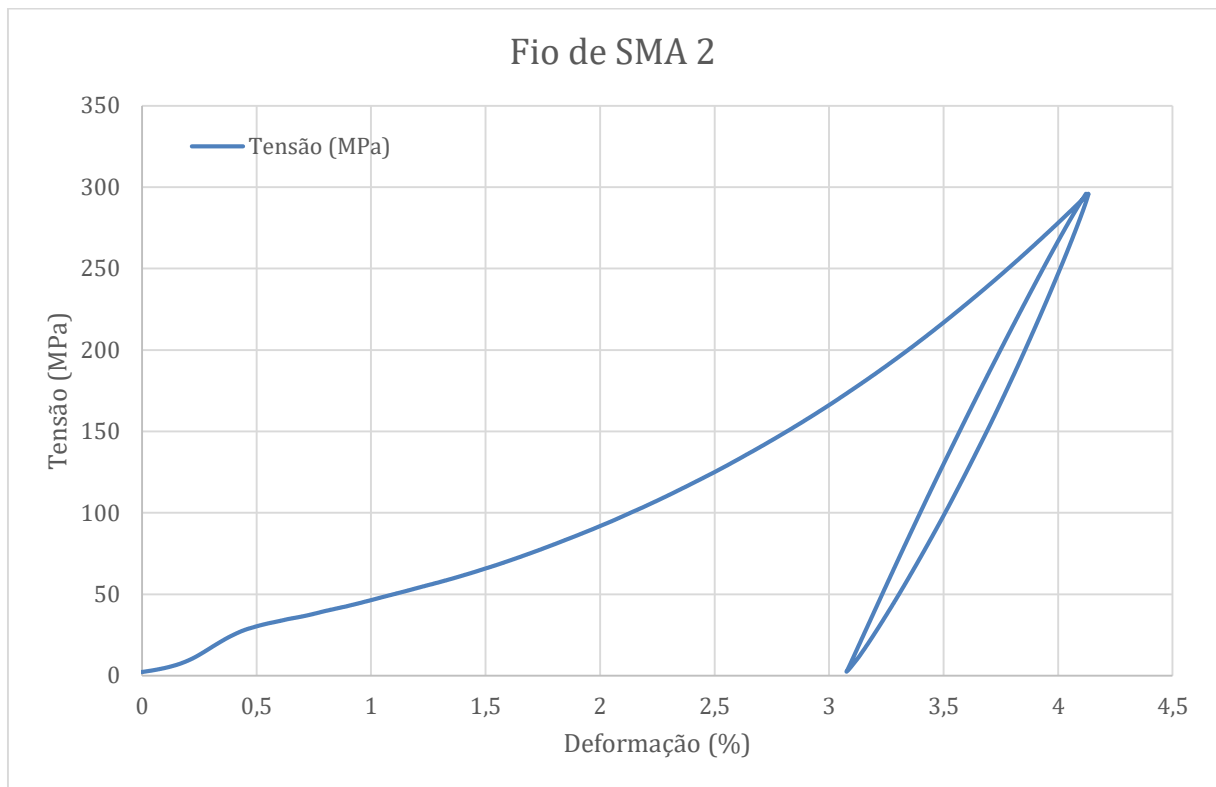


Figura 3.14: Gráfico Tensão x Deformação - Fio de SMA 2 com \varnothing 0,5mm.

A Figura 3.15 mostra um carregamento até um começo de transformação de fase martensítica em 30 MPa e se finaliza com uma deformação de 1,70 %. A deformação continua até 300 MPa, quando então alivia-se a tensão com o objetivo de conservar as propriedades do fio.

A pequena diferença entre os ensaios do início de transformação de fase martensítica se dá principalmente pela variação de temperatura do ambiente do laboratório utilizado para a caracterização.

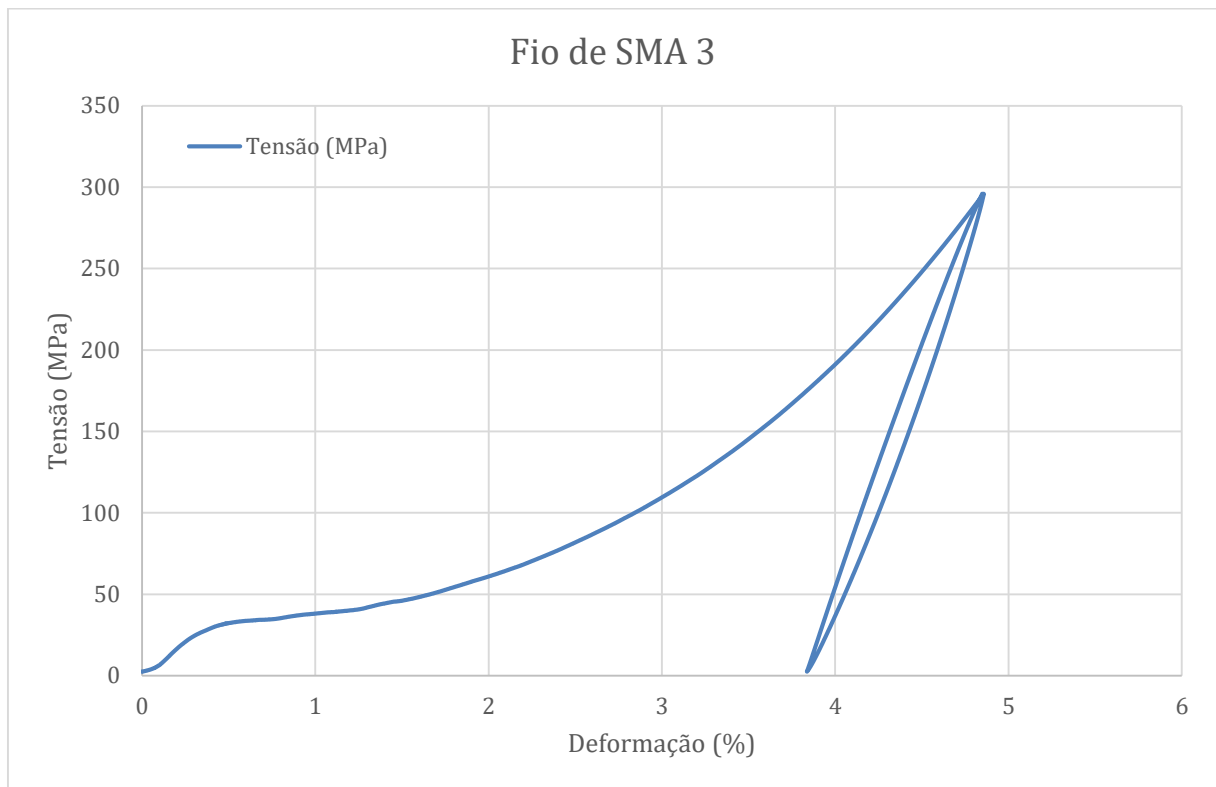


Figura 3.15: Gráfico Tensão x Deformação - Fio de SMA 3 com Ø 0,5mm.

3.2.5 Resina

A resina utilizada no projeto foi a AR260 e seu endurecedor AH260, da *Barracuda Composites*. No Anexo é possível encontrar o datasheet desta resina onde ela possui baixa viscosidade e, de acordo com o fabricante, é utilizada em uma proporção de 100 partes de resina para 26 partes de endurecedor, com ótimas propriedades mecânicas à temperatura ambiente e uma resistência ainda melhor se pós-curado durante 6 horas a 80°C.

3.2.6 Produção do Material Compósito Inteligente

Antes de iniciar o procedimento de produção do compósito, foi necessária a utilização, novamente, da substância desmoldante em toda a área interna do molde, de forma a garantir que após todo o processo o compósito resultante fosse retirado do molde sem nenhuma

dificuldade e sem nenhum dano à ambas as estruturas. A operação consistiu em aplicar o desmoldante 5 vezes seguidas nas superfícies internas do molde, respeitando um pequeno intervalo de minutos que fossem suficientes para secar o desmoldante entre cada operação.

Como parte do preparo do molde para confecção do compósito, cortaram-se 4 tiras de borracha com as dimensões internas do molde e foram acomodadas de forma adjacente às paredes internas do mesmo. Foram realizadas pequenas incisões nas tiras de borracha para posteriormente encaixar os fios de SMA que seriam utilizados no experimento, com o intuito de fixar os fios em uma posição determinada, evitando que eles se deslocassem sobre o molde.

Na sequência da confecção do compósito, foram utilizadas 8 camadas de fibra de vidro unidirecionais, que foram cortadas conforme as medidas internas do molde e posteriormente ajustadas para medidas ligeiramente inferiores, pois precisavam encaixar no espaço interno, além de levar em conta as novas medidas do interior resultante da adição das tiras de borracha. Na Figura 3.16 e 3.17, pode ser observada a realização do corte das fibras nas dimensões desejadas e da impregnação da resina às fibras de vidro e o SMA.

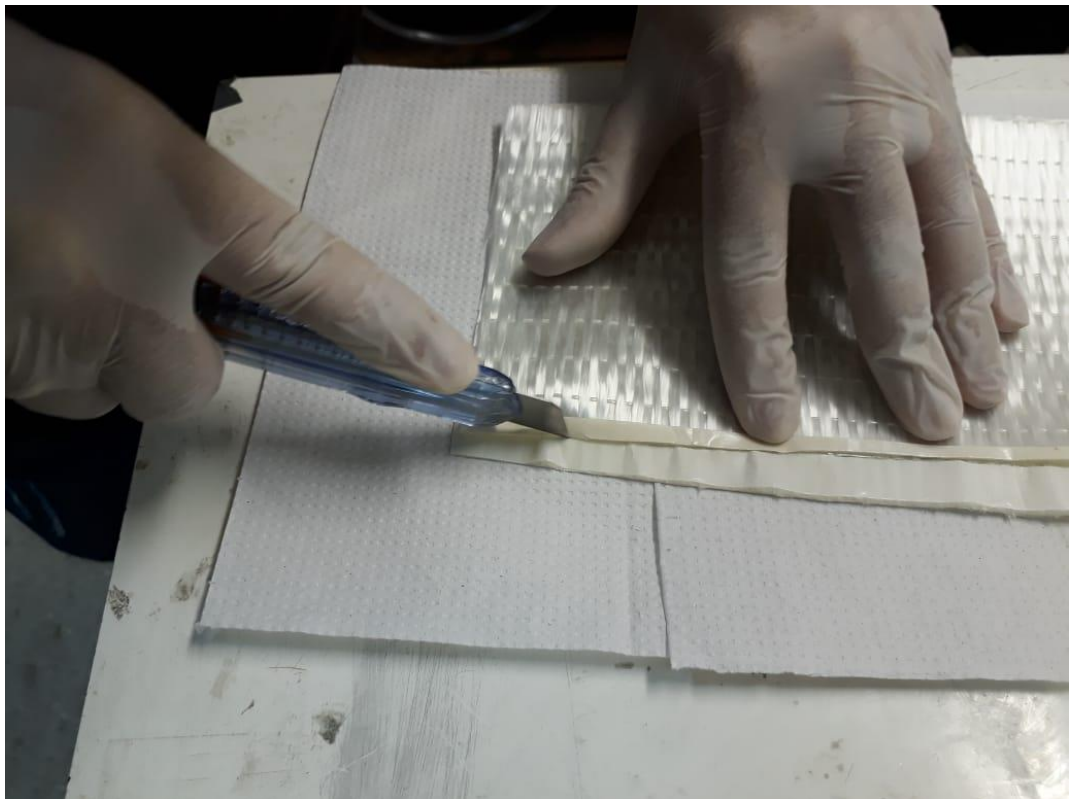


Figura 3.16: Corte das fibras de vidro nas dimensões desejadas.

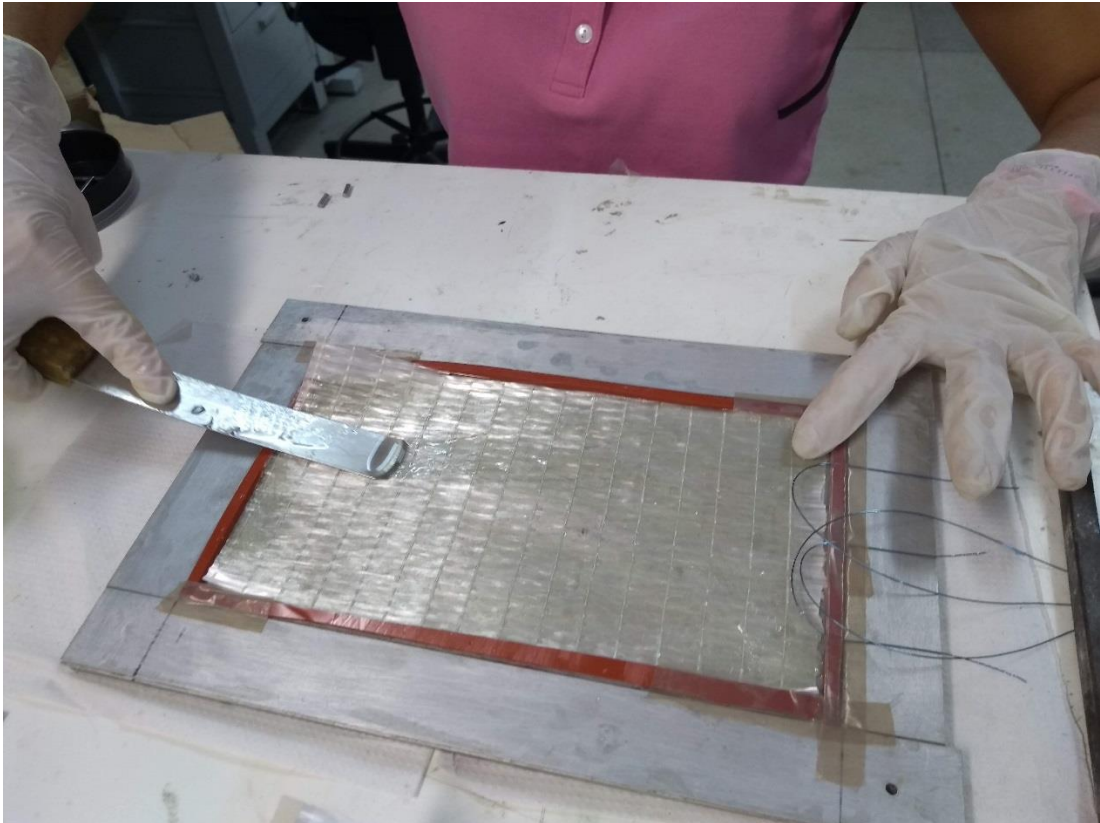


Figura 3.17: Aplicação de resina ao compósito inteligente de fibra de vidro unidirecional e fio de SMA.

Das 8 camadas utilizadas, foram aplicadas 4 camadas entre a base do molde e os fios de SMA pré-deformados e mais 4 camadas entre a superfície do SMA e a tampa do molde. Uma combinação da resina com seu endurecedor foi aplicada nas interfaces da fibra de vidro e do molde. A resina utilizada no preparo do compósito foi a AR-260 e o endurecedor AH-260 da *Barracuda Composites*. Na Figura 3.18, verificamos o material compósito inteligente pronto para polimerização.

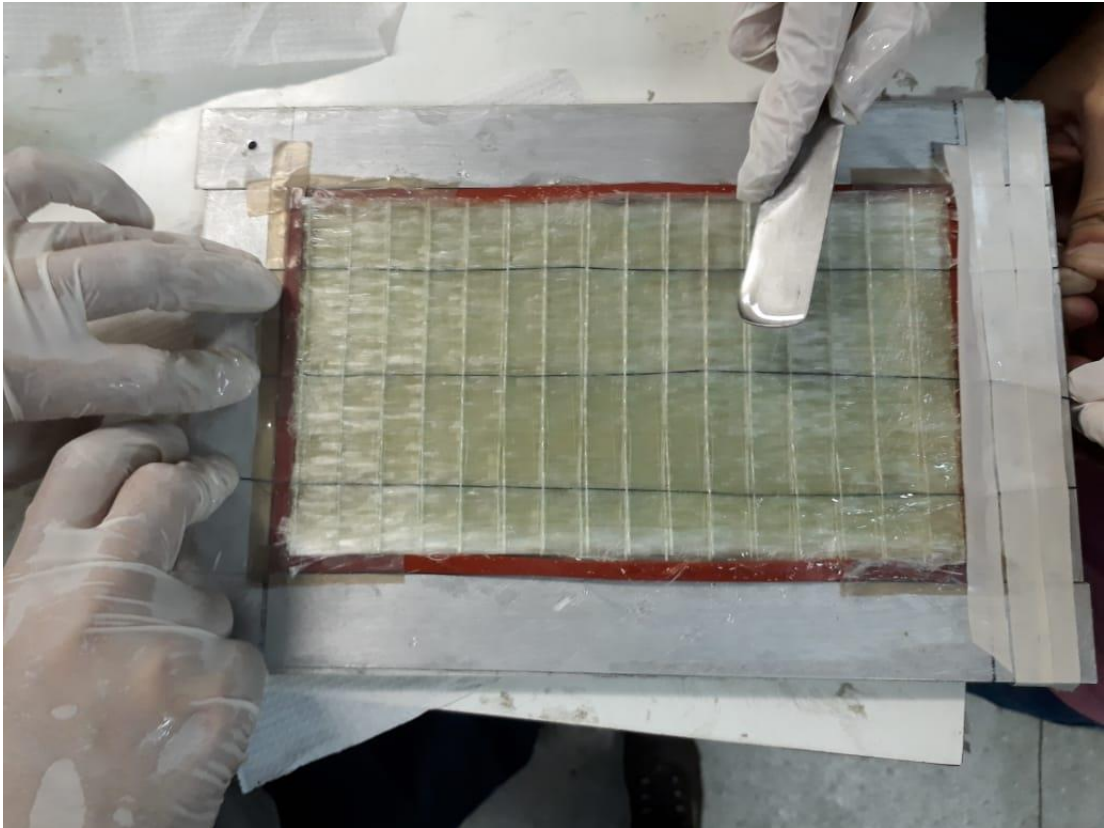


Figura 3.18: Completa impregnação do compósito inteligente.

Após todos os procedimentos anteriores, o compósito foi coberto com a placa superior do molde e foi levado à prensa hidráulica, onde foi submetido ao processo de cura a uma temperatura constante de 80°C por aproximadamente 6h consecutivas. Este procedimento pode ser observado na Figura 3.19, a seguir.



Figura 3.19: Compósito submetido ao processo de cura na prensa hidráulica

Ao final desse tempo, retirou-se o molde da prensa hidráulica e obteve-se o compósito desejado, verificado na Figura 3.20.

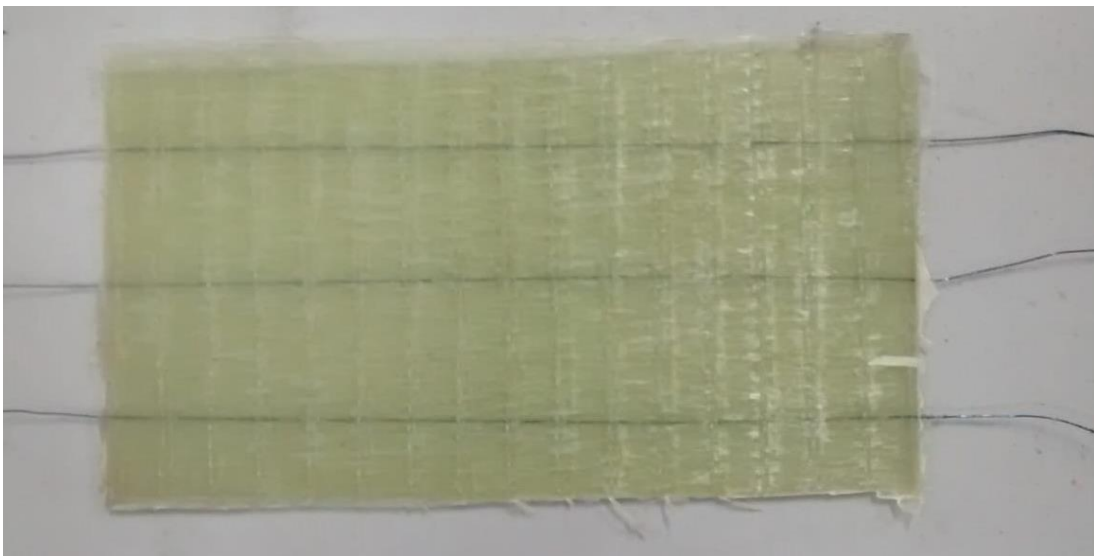


Figura 3.20: Compósito pronto para corte dos corpos de prova

Em seguida, como observado na Figura 3.21, o material compósito foi cortado de acordo com a Norma ASTM D790-03, que recomenda no parágrafo 7.3 que haja uma relação de comprimento de 40:1 com a espessura, além da largura ser especificada em 12,7 mm. Como a espessura tem 3 mm, a distância entre as extremidades tem que ter 132 mm (valor acrescido de 10% de tolerância).

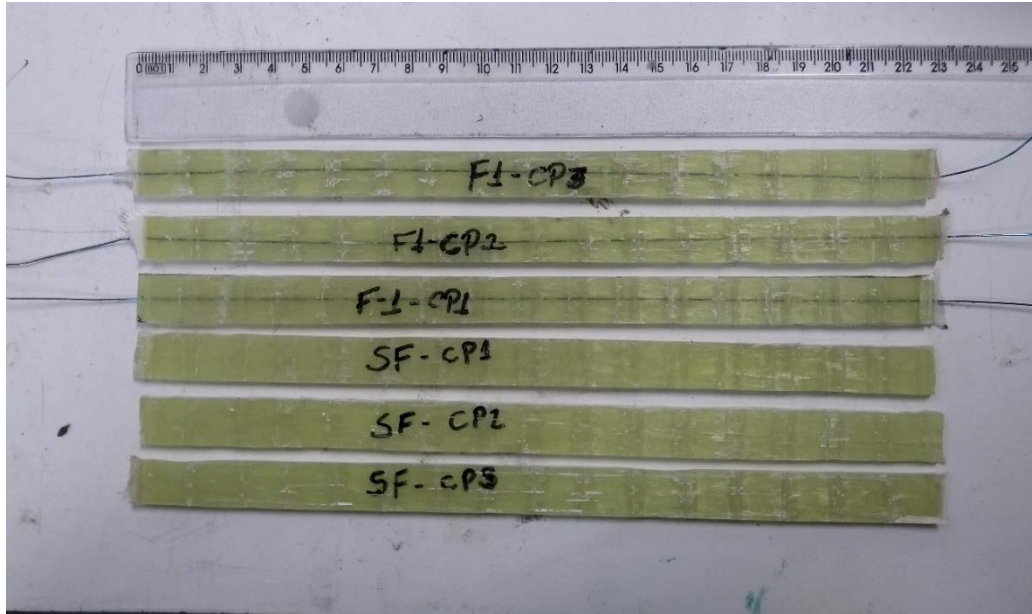


Figura 3.21: Corpo de Prova com fio e sem fio nas dimensões exigidas para teste de comparação.

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo, serão mostrados as análises e resultados obtidos através do ensaio de flexão do material compósito.

Inicialmente, foi realizado teste de flexão no compósito sem o fio de SMA, a fim de obter resultados que, posteriormente, seriam utilizados comparativamente ao ensaio obtido com fio de SMA. Todos os ensaios foram realizados a temperatura de $T=26^{\circ}\text{C}$.

A Figura 4.1 apresenta o resultado do ensaio de flexão do SF-CP1. Pode ser observado que o teste ocorreu até o rompimento do compósito. Isso se deu para avaliar a força máxima de flexão, além de determinar o deslocamento máximo exigido. Nota-se que o C.P. falhou com uma força de aproximadamente 410 N e seu deslocamento atingiu quase 19 mm.

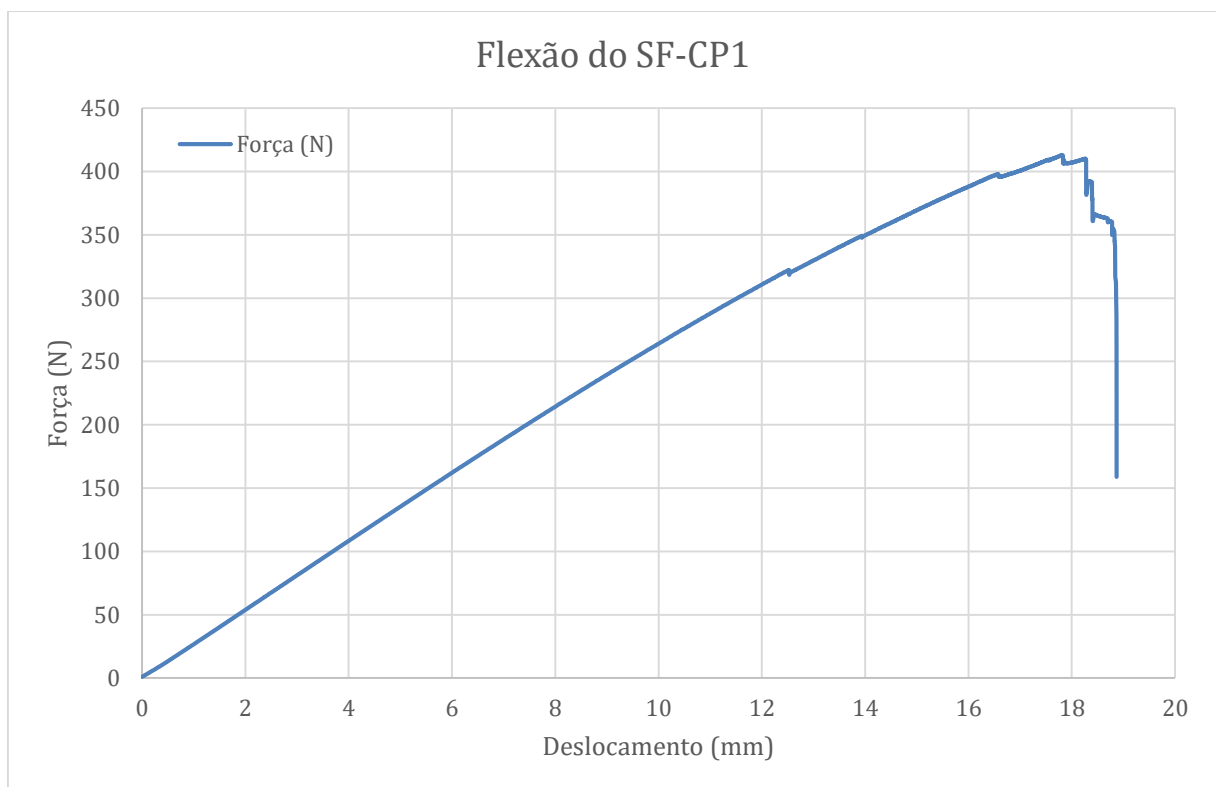


Figura 4.1: Ensaio de Flexão do SF-CP1.

O ensaio foi repetido para o SF-CP2 com a intenção de ratificar os resultados. Conforme observado na Figura 4.2, o gráfico mostra um crescimento da força máxima de flexão em relação ao SF-CP1. A força observada nesse material foi de cerca de 530 N. Essa elevada

melhora pode ter relação com a variação da espessura do material compósito e possíveis falhas locais no compósito SF-CP1. O deslocamento máximo atingido foi de 23 mm.

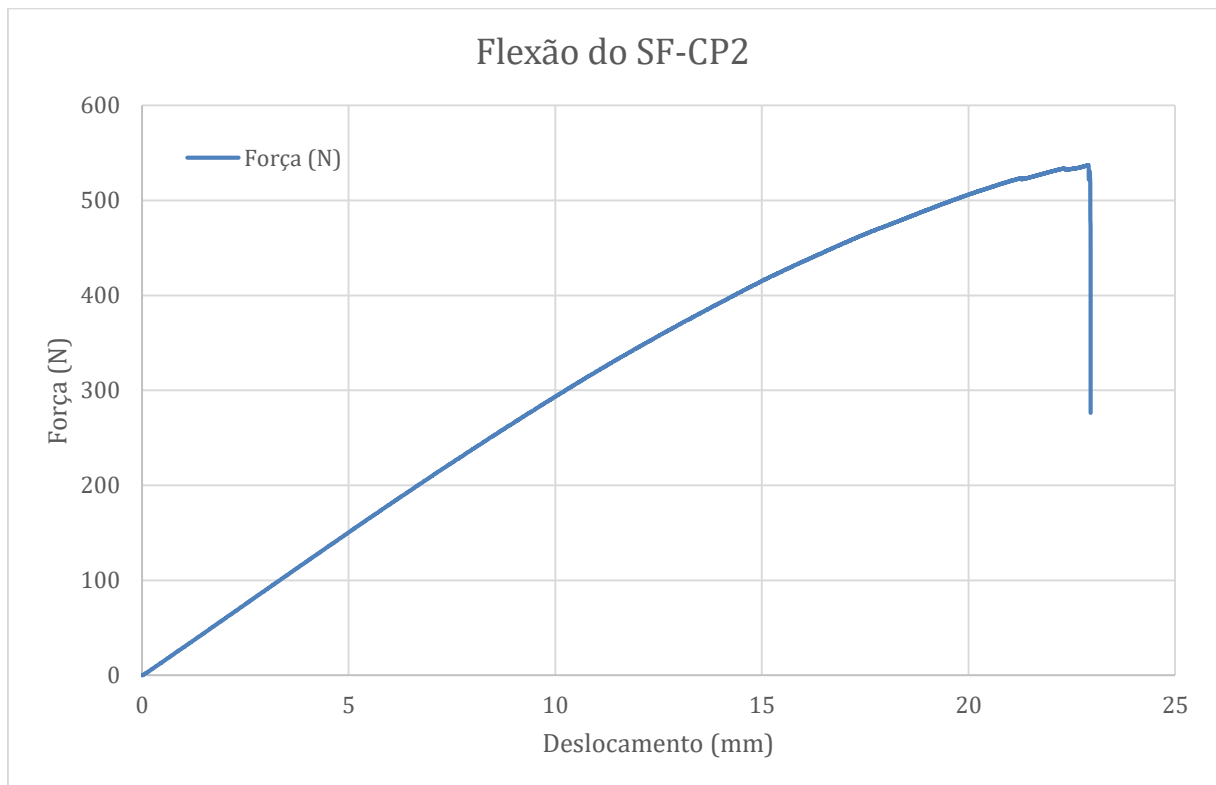


Figura 4.2: Ensaio de Flexão do SF-CP2

A Figura 4.3 expõe os resultados referentes ao SF-CP3. Ele teve uma ligeira redução de resistência a força máxima de flexão em relação ao SF-CP2, chegando ao limite de ruptura em 500 N, porém houve um aumento no deslocamento máximo, onde atingiu o patamar de quase 24 mm.

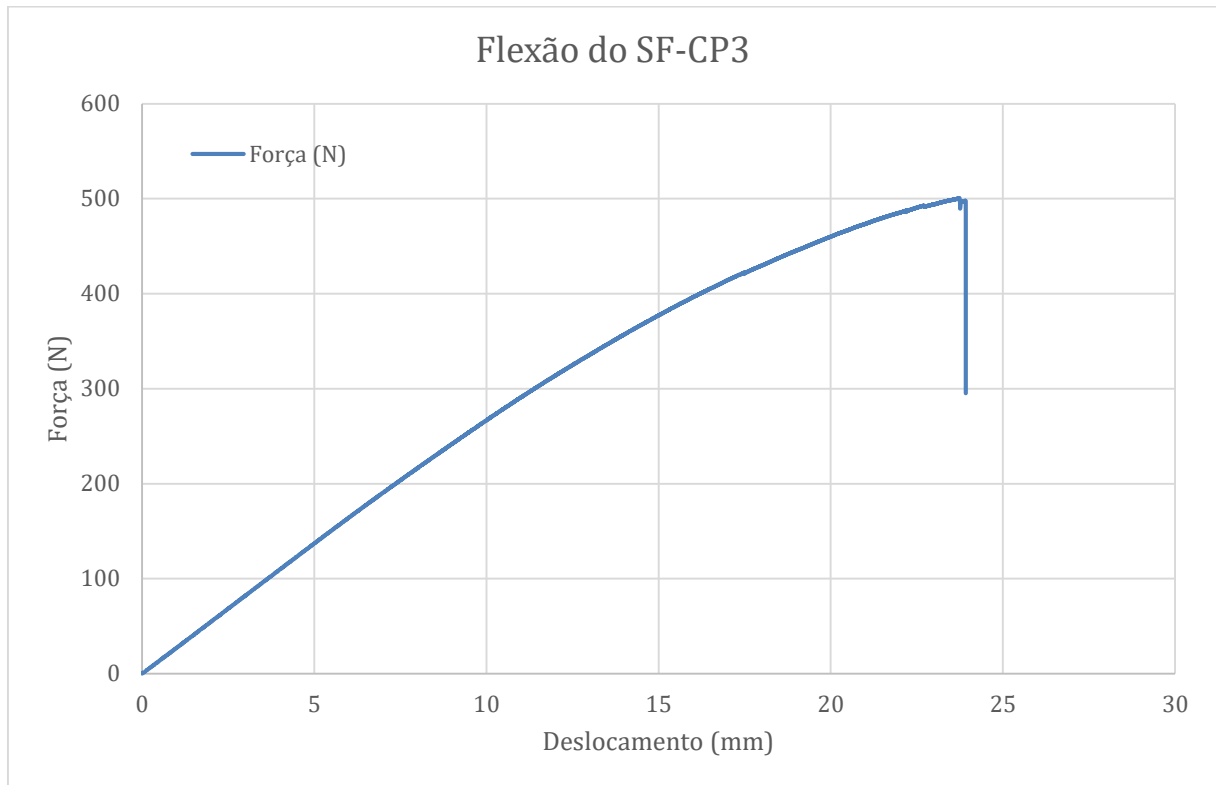


Figura 4.3: Ensaio de Flexão do SF-CP3.

Apesar de todo o cuidado no processo de moldagem, na tentativa de obter resultados uniformes, os corpos de prova tiveram pequenas variações de espessura no decorrer do comprimento. Assim, ficou clara a diferença nos gráficos obtidos.

A Figura 4.4 revela o resultado do ensaio de flexão ocorrido com o F1-CP1 até a sua ruptura. Neste processo, o teste ocorreu sem a introdução de corrente elétrica no fio. Comparativamente, a introdução do fio não representou um concentrador de tensão ou facilitador de falha no material compósito, visto que seus resultados foram similares aos testes feitos sem fio. A força máxima de flexão no F1-CP1 foi de 460 N e o deslocamento máximo chegou em torno de 20 mm.

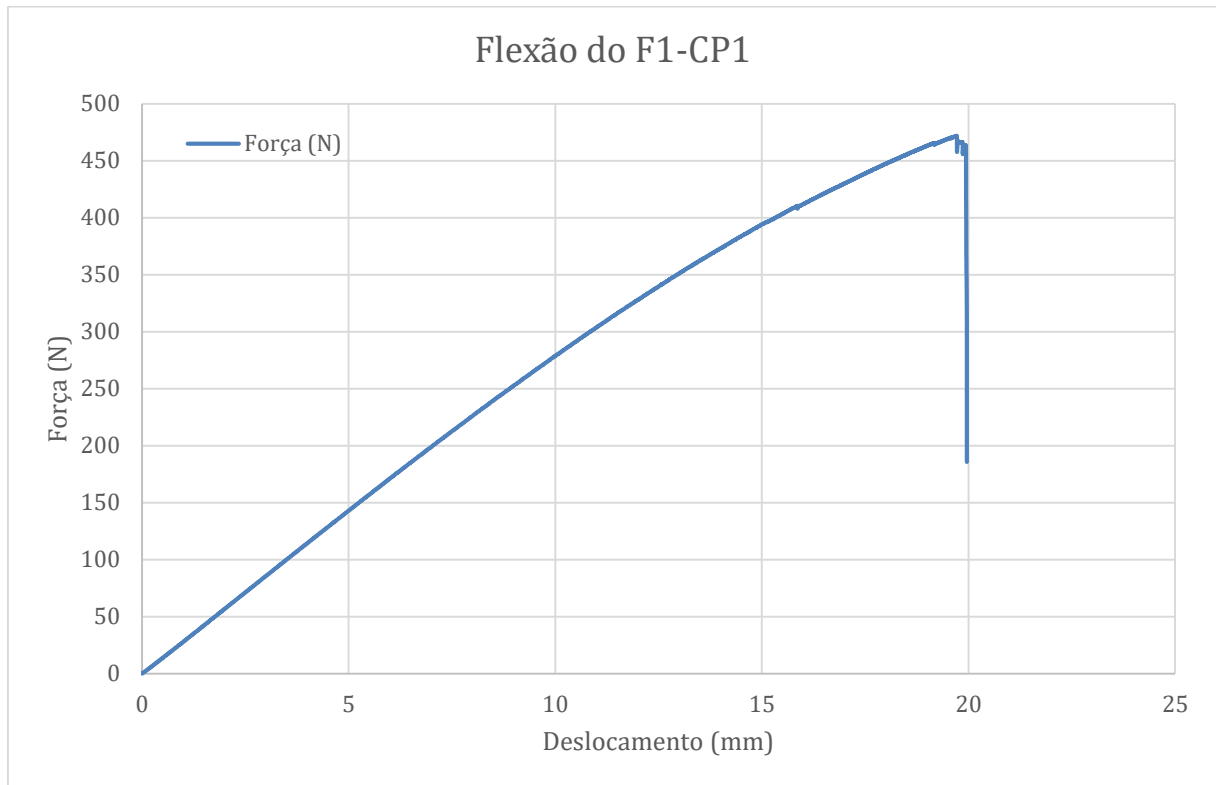


Figura 4.4: Ensaio de Flexão do F1-CP1.

O ensaio feito no F1-CP2, como mostrado na Figura 4.5, foi realizado em quatro ciclos: o primeiro sem utilização de corrente elétrica, o segundo ciclo introduziu uma corrente elétrica de 1 A, 2 A no terceiro ciclo para verificar a atuação e comportamento do SMA no compósito e o quarto ciclo, sem corrente elétrica, foi para verificar as condições do corpo de prova. Pode-se observar que ele mantém o comportamento anterior e apresenta deslocamento idêntico aos ciclos antecedentes e uma força de flexão bem próxima da obtida no ciclo de 2 A. Neste corpo de prova, utilizou-se da aplicação de ciclos de carregamento para testar seu comportamento e capacidade de recuperação, por este motivo foi utilizada uma carga ligeiramente menor que a de ruptura do material. Observando o gráfico, a linha azul representa o primeiro ciclo, sem corrente elétrica, e a linha amarela o ciclo de 1 A. Elas são coincidentes pois a introdução de 1 A não gerou uma elevação de temperatura suficiente para alterar a estrutura do fio e comprimir o compósito. Nessa etapa, houve um deslocamento de 12 mm estabelecido previamente pela máquina e com uma força máxima de flexão de 335 N. Ao analisar o terceiro ciclo de linha vermelha, é visível que o material sofre um deslocamento de 12 mm, a mesma dos ciclos anteriores, porém com uma força de 315 N. O quarto ciclo ocorreu após o resfriamento do corpo de prova e sem introdução de corrente elétrica. Ele é representado pela linha roxa. Pode-se observar que ele mantém o comportamento anterior e apresenta deslocamento idêntico aos

ciclos antecedentes e uma força de flexão bem próxima da obtida no último ciclo com introdução de corrente elétrica de 2 A.

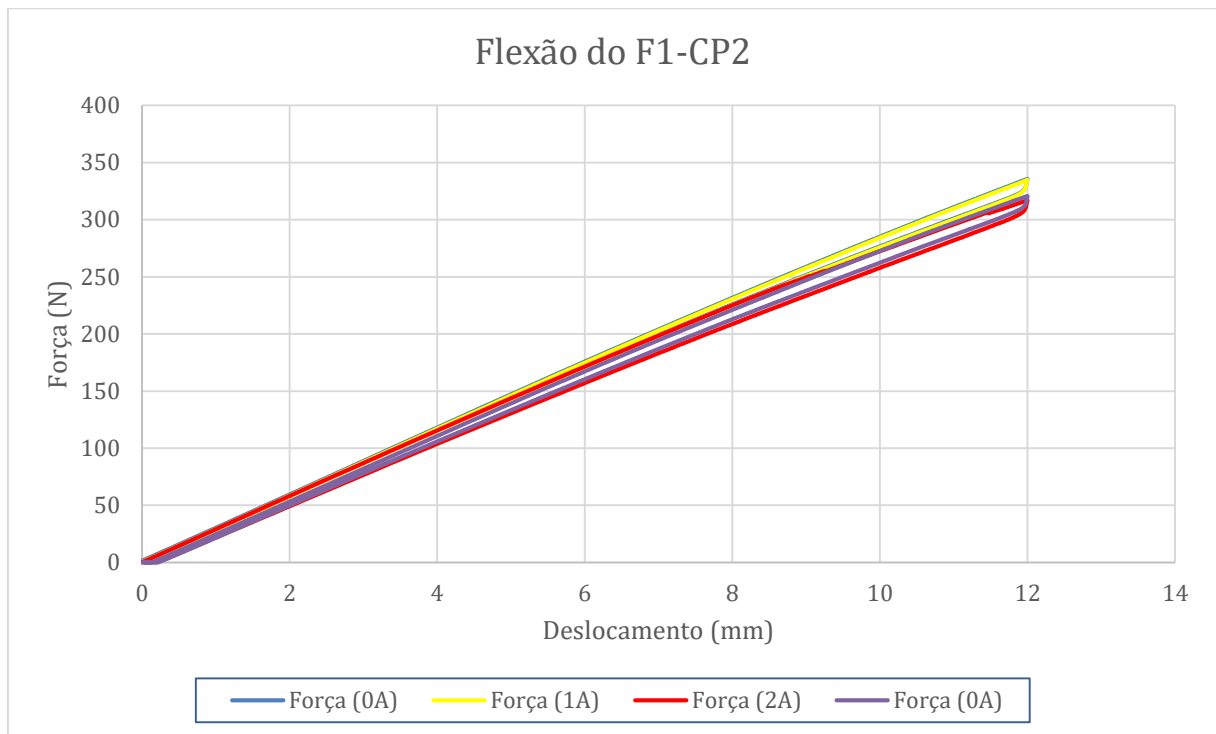


Figura 4.5: Ensaio de Flexão do F1-CP2.

O teste realizado na Figura 4.6 ocorreu com o auxílio de duas placas acopladas e travadas nas extremidades do compósito com a assistência de parafusos. O objetivo deste experimento era gerar uma reação uniforme na compressão produzida pelo fio e assim obter um melhor resultado. Analisando o gráfico, é possível observar que não houve uma melhoria em relação aos testes anteriores. Além disso, o corpo de prova acabou rompendo pela circunstância descrita anteriormente, onde suas propriedades não retornaram as condições iniciais após o aquecimento.

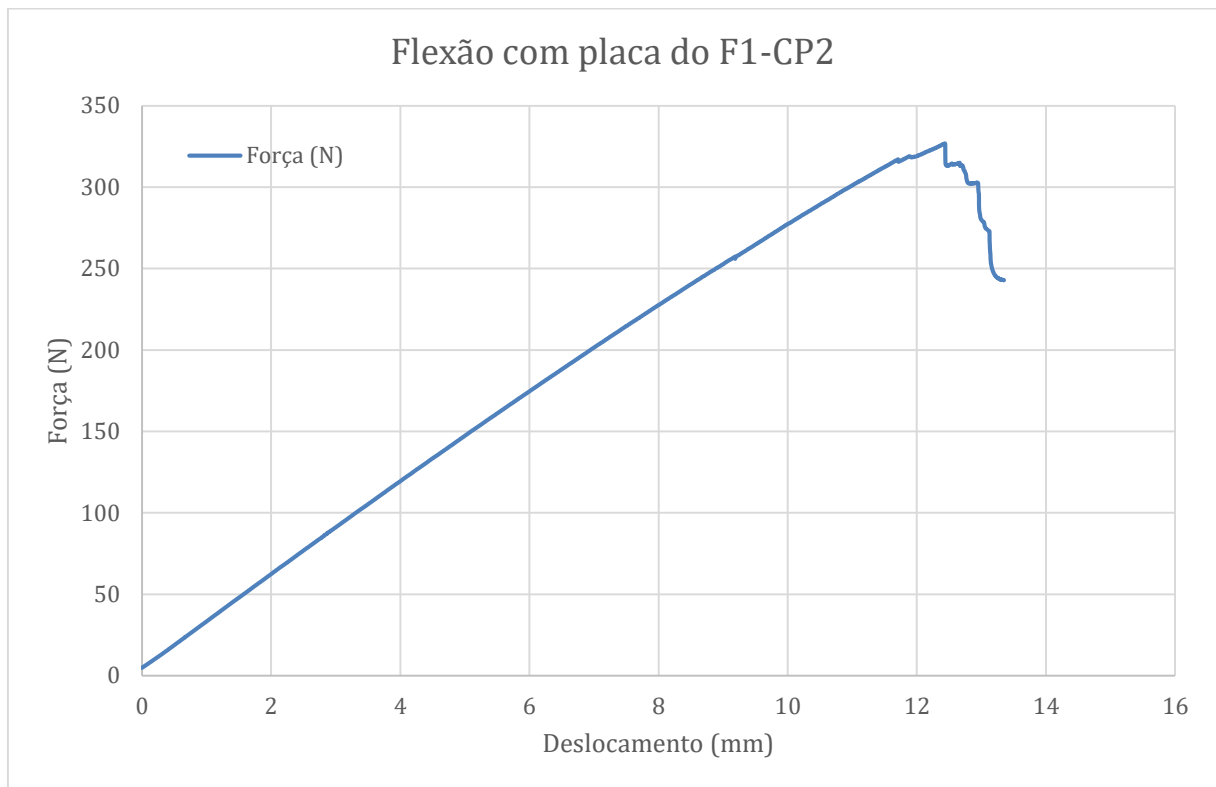


Figura 4.6: Ensaio de Flexão do F1-CP2 com placas.

O gráfico seguinte, na Figura 4.7, mostra o resultado dos ensaios no F1-CP3, utilizando as condições nos ciclos com máximo deslocamento de 15 mm, e variação da corrente elétrica considerando o primeiro ciclo sem introduzir corrente elétrica, representado pela cor azul e com 2 A no segundo ciclo de cor vermelha, onde é possível verificar que foi realizado até seu rompimento. Comparando com os ensaios anteriores nos corpos de prova utilizando o fio de SMA, nota-se que o valor da força de flexão para esse patamar tenha sido em aproximadamente 350 N, valor um pouco acima dos outros. Ao prosseguir o deslocamento, o gráfico mostra algumas oscilações na força, o que demonstra que a estrutura estava apresentando algumas falhas, porém, ao retirar a carga para realização de outro ciclo, evitou-se o rompimento do compósito.

A etapa seguinte, com uso de 2 A teve o mesmo comportamento da última etapa no fio anterior, F1-CP2, deslocando-se até um mesmo valor do ciclo inicial, 15 mm, porém com uma menor força, aproximadamente 280 N. Um pouco acima desse valor de força, o corpo de prova rompeu. Observando o gráfico, nota-se que ele falhou próximo ao ponto onde no ciclo anterior foi observada uma descontinuidade na aplicação da força de flexão, o que demonstrava que o material estava próximo de sua ruptura. É válido observar que o último corpo de prova rompeu

com um deslocamento consideravelmente menor do que nas amostras anteriores que também falharam.

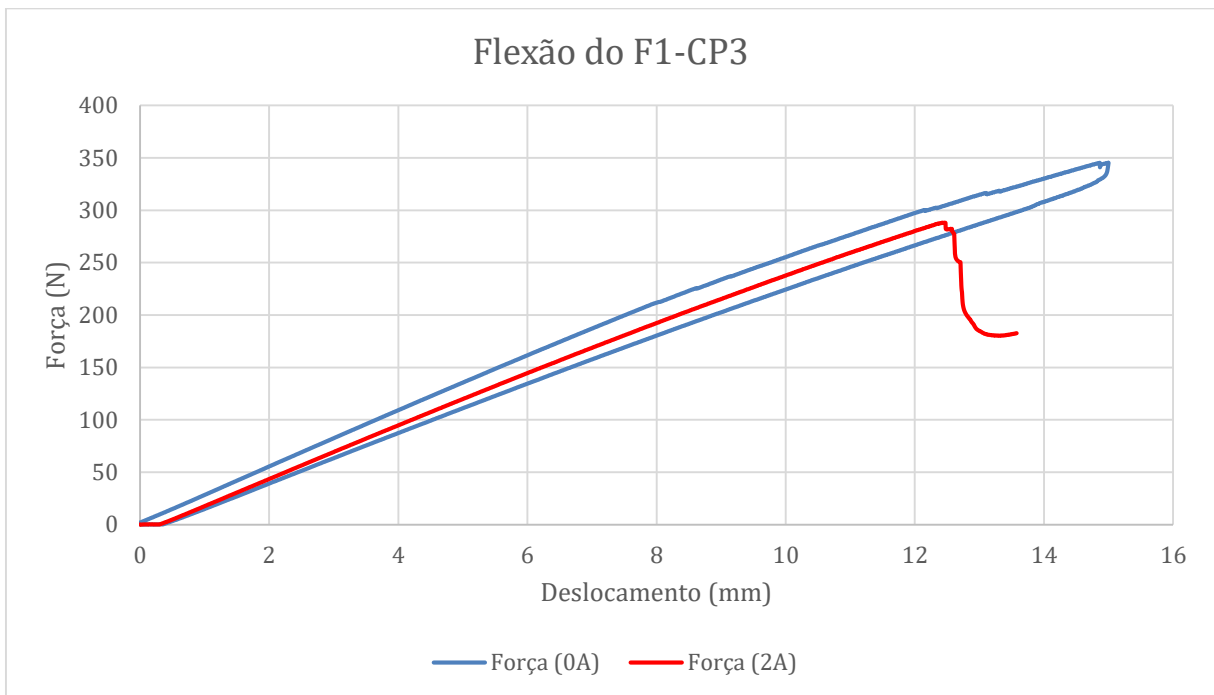


Figura 4.7: Ensaio de Flexão do F1-CP3.

A seguir, são verificados os corpos de prova rompidos após os testes, na Figura 4.8.

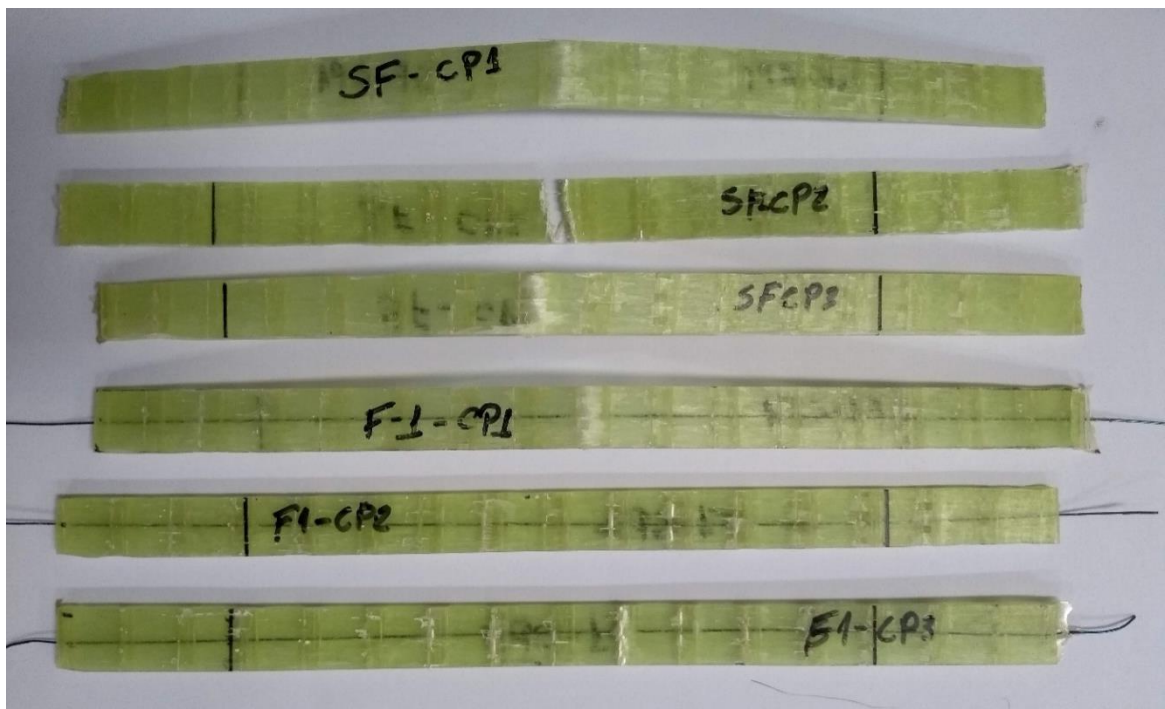


Figura 4.8: Corpos de Prova após os ensaios de Flexão.

Na Tabela 4.1 foi colocada a força máxima observada nos gráficos de cada ensaio, seus deslocamentos máximos e a variação da redução de força aplicada ao compósito dos corpos de prova com fio sem aplicação de corrente elétrica e com a aplicação de 2 A de corrente elétrica.

Tabela 4.1: Força Máxima, Deslocamento e Variação entre os compósitos.

	Força Máxima (N)	Deslocamento (mm)	Variação
Sem Fio 1	415	19	-
Sem Fio 2	530	23	-
Sem Fio 3	500	24	-
Com Fio 1 (i=0)	470	20	-
Com Fio 2 (i=0)	330	12	-
Com Fio 2 (i=1)	330	12	-
Com Fio 2 (i=2)	310	12	6%
Com Fio 2 (após)	310	12	-
Com Fio 2 (placa)	310	12	-
Com Fio 3 (i=0)	340	15	-
Com Fio 3 (i=2)	280	12	6%

5 Conclusões

O estudo desse compósito inteligente é importante para apresentar a viabilidade e proporcionar um aprofundamento desse tipo de compósito em aplicações cotidianas. Há vários estudos, como os diversos citados ao longo do projeto, indicando uma melhoria considerável não só em atividades do meio científico e acadêmico, mas também em áreas da construção civil, aeroespacial, segurança, automotiva e etc.

O intuito da introdução do fio no compósito tinha o objetivo de gerar uma melhoria ao composto inteligente, porém muitas variáveis influenciam na atuação do efeito da memória de forma, como a temperatura do ambiente, a condição do compósito, controle do processo de fabricação, a transferência de calor pela utilização de corrente elétrica no fio, os diversos ciclos de carregamento térmico e mecânico e a preservação das fibras.

Como a diferença entre as forças máximas apresentadas sem introdução de corrente elétrica ou com 2 A foram muito pequenas, não é possível garantir que o efeito gerado no compósito foi obtido pela geração de calor no fio.

Com a utilização da matriz termorrígida, as condições do compósito não permaneceram as mesmas após os ciclos de carregamento mecânico e elétrico. No F1-CP2 foi verificado que no carregamento após os ciclos com introdução de corrente elétrica, o compósito teve um comportamento diferente do inicial. Isso se dá pois há a delaminação das fibras ocasionada pela deformação ocorrida pelos ciclos de flexão.

Ao avaliar todos os ensaios, pôde-se depreender que houve uma redução da rigidez do material após a aplicação de corrente elétrica, e por consequência, elevação de temperatura do fio. Esta condição pode ser analisada pois a temperatura empregada no fio possivelmente influenciou na adesão na interface do fio com o compósito.

De acordo com a Norma ASTM D790-03, os corpos de prova deveriam romper na região oposta ao carregamento, ou seja, na área tracionada no ensaio de Flexão, porém foi constatado que, além do compósito falhar na parte comprimida, a ruptura aconteceu na região fora do ponto de aplicação da força. O fato de o fio contribuir com a flexão do compósito por meio da sua compressão, pode ter contribuído para diminuir a força na tração nas fibras externas e colaborou para a compressão na parte interna, forçando assim a ruptura na região do carregamento.

6 Trabalhos Futuros

- Projetar e analisar este mesmo experimento utilizando placas fixas nas extremidades do compósito a fim de produzir uma compressão uniforme.
- Ensaio de tração do compósito inteligente.
- Análise de vibração experimental e numérica deste mesmo material.
- Estudar o critério de falha localizado na região do carregamento e avaliar o deslocamento do rompimento em relação ao ponto de aplicação.
- Projetar e estudar compósito inteligentes com mais de um fio de SMA e avaliar os efeitos gerados.
- Produzir compósitos inteligentes com fibras bidirecionais e estudar o comportamento.
- Utilizar resina termoplástica para apresentar um comportamento mais flexível ao material e analisar essa mudança de matriz.

7 Referências Bibliográficas

ABBOUDI, J., *The response of shape memory alloy composites*, **Smart Materials and Structures**, v. 6, n. 1, pp. 1-9, Oct. 1997.

AIROLDI, G., RIVA, G. & VANELLI, M., *Superelasticity and Shape Memory Effect in NiTi Orthodontic Wires*, *Journal de Physique IV*, Vol. 5, n. 8, pp. 1205-1210, 1995.

AIROLDI, G. & RIVA, G., *The NiTi Alloys in Orthodontics, Bio Medical Materials and Engineering*, *Innovative Materials*, Vol. 6, n. 4, pp. 299-305, 1996.

AIROLDI, G., RIVA, G., VANELLI, M., FILIPPI, V. & GARATTINI, G., *Oral Environment Temperature-Changes Induced by Cold/Hot Liquid Intake*, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, Vol. 112, Iss 1, pp. 58-63, 1997.

ANDERS, W.S. & ROGERS, C.A., *Design of a Shape Memory Alloy Deployment Hinge for Reflectors Facets*, *Structural Dynamics and Materials Conference - Part I*, pp. 148-158, AIAA Paper AIAA-91-1162-CP, 1991.

ANDERS, W.S., ROGERS, C.A. & FULLER, C.R., *Vibration and Low-frequency Acoustic Analysis of piecewise-activated Adaptive Composite Panels*, *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, pp. 103-120, 1992.

ANTICO, F. C.; ZAVATTIERI, P. D.; HECTOR JR., L. G.; MANCE, A; RODGER, W. R.; OKANSKI, D. A.: *Adhesion of nickel-titanium shape alloy wires to thermoplastic materials: theory and experiments*, **Smart Materials and Structures**, v. 21, n. 3, pp. 1-5, Feb. 2012.

KEITH B. ARMSTRONG; BEVAN, L.G.; COLE, W.F.; *Care and Repair of Advanced Composites*, 2^aed. SAE INTERNATIONAL, 2005

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

BAZ, A., IMAM K. & MCCOY, J., *Active Vibration Control of Flexible Beams Using Shape Memory Actuators*, *Journal of Sound Vibrations*, n. 140, pp. 437-456, 1990.

BAZ, A., POH, S. & GILHEANY, J., *Multi-Mode Distributed sensor for Vibrating Beams*, *Journal of Sound Vibrations*, Vol. 165, pp. 481-495, 1993.

BOGOTTO, SALA, G.; BETTINI, P. *Monitoraggio di componenti strutturali aeronauticicom sensori in fibra ottica*, Politecnico di Milano, 2015.

BONCI, A., CARLUCCIO, G., CASTELLANO, M. G., CROCI, G., INFANTI, S., VISKOVIC, A. *Use of Shock Transmission Units and seismic Protection of Monuments*. University of Roma "La Sapienza", 2001.

BUSCH, J.D., PURDY, W.E. & JOHNSON, A.D., *Development of a Non-Explosive Release Device for Aerospace Applications*, 26th Aerospace Mechanisms Symposium, 1992.

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

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

CASTILHO, W. S. de., *Caracterização Termomecânica de Compósitos Híbridos com Memória de Forma*, Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

CULLINAN, J F., WISNOM, M., BOND, I. *A novel method for the manipulation of damage and in-situ repair of composite T-joints*. In: *56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, structural dynamics and materials conference*, pp. 1-10, Reston, Virginia, USA, 2015.

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

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, pp. 1521-1535, 1974.

DOREY, A. P.; MOORE, J. H. **Advances in Actuators**. IOP Publishing, 1995.

DYNALLOY INC. Tech Sheets. DYNALLOY, Inc. **Makers of Dynamic Alloys**. Disponível em: <http://www.dynalloy.com/tech_sheets.php>. Acesso em 29 de setembro de 2018.

DUERIG, T.W., STOCKEL, D. & KEELEY, A., *Actuator and Work Production Devices, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, London, pp. 181-194, 1990.

FERNANDES, G F.: *Construção e Caracterização de Mola Helicoidal com Memória de forma Aplicada em um Atuador Linear Termoativo*, Dissertação de B.Sc.; Universidade de São Paulo, Lorena, São Paulo, Brasil, 2014

FIO ORTODÔNTICO. PickLuck Disponível em:
<http://www.imgrum.org/media/1258805465371127164_1286579362> Acesso em
01/12/2017

F. M. BRAZ FERNANDES, *Ligas com memória de forma Departamento de Ciência dos Materiais / CENIMAT*, Abril de 2006.

FONTES, R. S.: *Compósitos Poliméricos reforçados por Tecidos Multiaxiais Acoplados: Anisotropia, Configuração e Concentração da Deformação*, Dissertação de D.Sc.; Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil, 2017

FULLER, C., ROGERS, C.A. & ROBERTSHAW, H.H., *Active Structural Acoustic with Smart Structures*, SPIE Conference on Fiber Optic Smart Structures and Skins, Vol. 1170, pp. 338-358, 1989.

FUNAKUBO, H. (Ed.): **Shape Memory Alloys**. Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1984.

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

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

GOO, B.C. & LEXCELLENT, C., *Micromechanics-Based Modeling of Two-Way Memory Effect of a Single-Crystalline Shape-Memory Alloy*, ACTA MATERIALIA, Vol. 45, pp. 727-737, 1997.

GUIDEWIRE. Cath Lab Digest. Disponível em: <<https://www.cathlabdigest.com/articles/The-Runthrough-NS-Guidewire-Lessons-after-2000-uses>> Acesso em 01/12/2017

HEBDA, D.A. & WHITE, S.R., *Effect of Training Conditions and Extended Thermal Cycling on Nitinol Two-Way Shape Memory Behavior*, Smart Materials & Structures, n. 4, pp. 298-304, 1995.

Intech (Open Science). Disponível em: <<http://www.intechopen.com>>. Acesso em 03 novembro 2018.

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

JIN, H., DONG, E., XU, M., LIU, C., ALICI, G. and JIE, Y., *Soft and smart modular structures actuated by shape memory alloy (SMA) wires as tentacles of soft robots*. *Smart Mater. Struct.* **25**, 085026, 2016.

K. OTSUKA, X. REN, “*Martensitic transformations in nonferrous memory shape alloys*”, *Materials Science and Engineering A* **273–275** (1999) 89–105

Kim M S, Chu W S, Lee J H, Kim Y M and Ahn S H. *Manufacturing of inchworm robot using shape memory alloy (SMA) embedded composite structure*, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, v.12 n.3, pp. 565–8, 2011.

KRISHNAN, R. V.; DELAEY, L.; TAS, H. **Thermoelasticity, pseudoelasticity, and the Memory Effects Associated with Martensitic Transformations. Part 2, The Macroscopic Mechanical Behavior.** Journal of Materials Science, 9, pp. 1536-1544, 1974.

LA CAVA, C A P L; SILVA, E P; MACHADO, L G.: *Modelagem de Dispositivos Mecânicos Fabricados de Ligas com Memória de Forma*, Dissertação de B.Sc., CEFET/RJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2000

MARINE COMPOSITES,. **Sistema de resina AR 260 e AH 260 Datasheet.** Disponível em <http://www.marinecomposites.com.br/wpcontent/uploads/datasheets/resina_epoxy_ar260.pdf>. Acesso em 29 de setembro de 2018.

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

MENDONCA, P. T. R. **Materiais Compostos & Estruturas-Sanduiche: Projeto e Analise.** Ed. Manole, Barueri, Sao Paulo, Brasil, 2005.

MELZER, A. & STÖKEL, D., *Performance Improvement of Surgical Instrumentation through the Use of Ni-Ti Materials*, 1st International Conference Shape Memory and Superelastic Technologies, pp. 401-409, 1994.

MERLIN, Martia; SCOPONI, Martina; SOFFRITTI, Chiara; FORTINI, Annalisa; RIZZONI, Raffaella; GARAGNANI, Gian Luca.: *On the improved adhesion of NiTi wires embedded in polyester and vinylester resins*, Frattura ed Integrità Strutturale, n. 31, pp. 127-137 Cassino (FR) Italia, Jan. 2015.

MINAKUCHI, S., SUN, D., TAKEDA, N. *Hierarchical system for autonomous sensing healing of delamination in large scale composite structures.* Smart Materials and Structures, v. 23, n. 11, Oct 2014.

GHOSH, S K. *Self-healing materials: fundamentals, design strategies and applications*, 1ed. Weinheim, Wiley-VCH, 2008

MIRAMINI, A.; KADKHODAEI, M.; ALIPOUR, A.; MASHAYEKHI, M.: *Analysis of interfacial debonding in shape memory alloy wire-reinforced composites*, Smart Materials and Structures, v. 25, n. 1, pp. 15-36, Jan. 2016.

MO, Y. L., KAIRY, OTERO, K., SONG, G.: *Development and Testing of a Proof of Concept Smart Concrete Structure.* Department of Civil Engineering and Department of Mechanical Engineering, University of Houston, Texas, 2004.

NASCIMENTO, R L E do.: *Produção e Caracterização de Compósitos Inteligentes*, Dissertação de M.Sc., Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2009

NOSSA, T S.: *Efeito da temperatura de cura na temperatura de transição vítrea de um adesivo estrutural*, Dissertação de M.Sc.: Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, São Paulo, 2011.

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

PACHECO, P.M.C.L. & SAVI, M.A., *A Non-Explosive Release Device for Aerospace Applications Using Shape Memory Alloys*, XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1997.

PAIVA, A.: *Modelos Constitutivos para Ligas com Memória de Forma*, Dissertação de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2000

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

PRADER, P. & KNEISSL, A.C., *Deformation Behavior and Two-Way Shape-Memory Effect of NiTi Alloys*, *Zeitschrift Fur Metallkunde*, Vol. 88, pp. 410-415, 1997.

PRENSA HIDRÁULICA. Solab Científica. Disponível em: <[http://www.solabcientifica.com.br/equipamento?cd=432&p=sl-12---prensa-hidraulica-com-aquecimento-e-acionamento-eletrico-\(20-a-50-toneladas\)](http://www.solabcientifica.com.br/equipamento?cd=432&p=sl-12---prensa-hidraulica-com-aquecimento-e-acionamento-eletrico-(20-a-50-toneladas))> Acesso em: 20/08/2018

RABOUD, D., *Simulation of the Superelastic Response of SMA Orthodontic Wires*, Journal of Biomechanical Engineering-Transactions of the ASME, Vol. 120, n. 5, pp. 676-685, 1998.

REIS, A C M dos.: *Efeito da temperatura de cura na temperatura de transição vítrea de um adesivo estrutural*, Dissertação de M.Sc.; Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012

RODRIGUE, H, WANG, W, KIM, D R., *Curved shape memory alloy-based soft actuators and application to soft gripper*. Compos Struct, v.176, pp. 398–406, 2017.

RODRIGUES, M R A.: *Estudo da Reação de Cura da Resina Epóxi (ARALDIT F) com Anidro Ftálico e Trietilamina como Iniciador*, Dissertação de M.Sc.; Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 1991.

ROGERS, C.A., FULLER, C.R. & LIANG, C., *Active Control of Sound Radiation from Panel using Embedded Shape Memory Alloy Fibers*, Journal of Sound Vibrations, n. 136, pp. 164-170, 1990.

ROGERS, C.A., LIANG, C. & FULLER, C.R., *Modeling of Shape Memory Alloy Hybrid Composites for Structural Acoustic Control*, Journal Acoust. Soc. Am., n. 89, pp. 210-220, 1991a.

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

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.

SACHDEVA, R.C.L. & MIYAZAK, S., *Superelastic Ni-Ti Alloys in Orthodontics, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, pp. 452-469, 1990.

SAN JUAN, M JOSÉ.: *Applications of Shape Memory Alloys to the Transport Industry*; “International Congress on Innovative Solutions for the Advancement of the Transport Industry”, San Sebastian, Spain, October 4-6, 2006.

SILVEIRA, G. M. e CHERMONT, R. A., *Desenvolvimento de uma válvula inteligente acionada por atuador de liga de memória de forma*, CEFET/RJ, 2017.

SHAW, J.A. & KYRIADES, S., *Thermomechanical Aspects of Ni-Ti*, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 43, no 8, pp. 1243-1281, 1995.

SRINIVASAN, A. V.; Mc FARLAND, D. M. *Smart Structures, Analysis and Design*. Cambridge University Press, 2001.

STENT. Dom Total. Disponível em: <<http://domtotal.com/noticia/1167622/2017/07/materiais-inteligentes-efeito-memoria-de-forma-em-ligas-metalicas/>> Acesso em: 01/12/2017

STICE, J., *The Use of Superelasticity in Guidewires and Arthroscopic Instrumentation, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, pp. 483-489, 1990.

TAKEDA, M., HASHIMOTO, M. & SATO, K., *A New Displacement Sensor Using Pseudoelastic Titanium-Nickel Alloy Wire*, *Journal of Robotic Systems* 3, pp. 441-450, 1986.

T. TADAKI, K. OTSUKA, K. SHIMIZU, *Shape Memory Alloys*, *Annu. Rev. Mater. Sci.* 1988.

TESSADORI, E.; SALA, G.; BETTINI, P. *Misure di Deformazione e Temperatura Mediante Sensori a Fibra Ottica: Tecniche di Disaccoppiamento del Segnale*, Politecnico di Milano, 2011.

TOUMINEN, S. M. *Hiht Transformation Temperature Ni-Ti-Hf Alloys*. Proc.Int. Conf. on Shape Memory and Superelastic Technologies, March 7-10, Pacific Grove, CA, USA, pp. 49-54, 1994.

VERRI NUNES, A.L.L., Müller de Almeida, S.F., Palerosi, A.C. & Otubo, J., *Design of Satellite HoldDown/Release Devices on an Actuator Made of a Shape Memory to Satellite Solar Pannels of the Scientific Satellite SACI I*, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999.

WANG, Z. L.; KANG, Z. C., **Functional and Smart Materials**, Plenum Press, New York, 1998.

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.

WOOL, R P., *Polymer Interfaces: Structure and Strength*, Hanser Press, New York, 1995.

WOOL, R P., *Self-healing materials: A review*, Soft Matter, v. 4, n.10, pp.401-429, Feb 2008.

YANG H.; VOIGT A.; LIU, Y., **Thermal analysis of the effect of aging on the transformation behaviour of ti50.9at.% ni**, Materials Science and Engineering A, 2003.

YANG, T., ZHANG, J., MOURITZ, A P., WANG, C., **Healing of carbon fibre-epoxy composite T-joints using mendable polymer fibre stitching**, Composites Part B: Engineering, v. 41, n. 45, pp. 1499-1507, Feb 2013.

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.

ZHANG, J.X., LIU, Y.X., CAI, W. & ZHAO, L.C., *The Mechanisms of Two-Way Shape Memory Effect in a Cu-Zn-Al Alloy*, MATERIALS LETTERS, Vol. 33, pp. 211-214, 1997.

ZHANG, X.D., ROGERS, C.A. & LIANG, C., *Modeling of Two-way Shape Memory Effect, Smart Structures and Material*, ASME, New York, pp. 79-90, 1991.

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

8 ANEXOS

Ficha técnica da resina AR-260

Propriedades Mecânicas

Propriedade	Teste	Unidade	Valor
Cor	Visual	-	Âmbar claro
Dureza Shore D	ASTM D-2240	-	87
Resistência à tração	ASTM D-638	MPa	73,77
Módulo de tração	ASTM D-638	MPa	3157,80
Resistência ao alongamento	ASTM D-638	%	8,8
Resistência à compressão	ASTM D-695	MPa	88,94
Resistência à flexão	ASTM D-790	MPa	199,28
Módulo de flexão	ASTM D-790	MPa	2737,22
HDT - Cura a temperatura ambiente	ASTM D-648	°C	58
HDT - Temperatura de pós-cura	ASTM D-648	°C	98
Impacto Izod, com entalhe	ASTM D-256	kJ/m ²	2,67
Contração	ASTM D-2566	mm/mm	<0,002

Propriedades de Manuseio

Propriedade	Teste	Unidade	Valor
Densidade da Resina	ASTM E-201	Kg/m ³	1150,33
Densidade do endurecedor	ASTM E-201	Kg/m ³	946,63
Viscosidade da Resina a 25°C	ASTM D-2393	cps	1200
Viscosidade do Endurecedor a 25°C	ASTM D-2393	cps	30
Viscosidade Mista a 25°C	ASTM D-2393	cps	300
Viscosidade Mista a 49°C	ASTM D-2393	cps	140
Taxa de mistura por peso (100 A)	Calculado	-	100A : 26B
Gel time a 25°C (150g massa)	ASTM D-2471	minutos	290
Pot life a 25°C (150g massa)	ASTM D-2471	minutos	120