

Estudo do compósito híbrido de matriz polimérica reforçado com fibra de Carbono e liga de Níquel-Titânio

Filipe de Almeida da Silva Soares

Relatório final da Unidade Curricular de Dissertação/Estágio/Projeto apresentado à

Mestrado em Engenharia Industrial – Ramo Engenharia Mecânica

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

Para a obtenção do grau de mestre em

Engenharia Industrial – Ramo Engenharia Mecânica

No âmbito da dupla diplomação com o CEFET/RJ

Orientadores:

Doutor Carlos Alberto Rodrigues Andrade

Doutor Luiz Alberto dos Santos

Bragança

2020

Estudo do compósito híbrido de matriz polimérica reforçado com fibra de Carbono e liga de Níquel-Titânio

Filipe de Almeida da Silva Soares – a38199

Relatório final da Unidade Curricular de Dissertação/Estágio/Projeto apresentado à

Mestrado em Engenharia Industrial – Ramo Engenharia Mecânica

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

Para a obtenção do grau de mestre em

Engenharia Industrial – Ramo Engenharia Mecânica

No âmbito da dupla diplomação com o CEFET/RJ

Orientadores:

Doutor Carlos Alberto Rodrigues Andrade

Doutor Luiz Alberto dos Santos

Filipe de Almeida da Silva Soares

25/11/2020

A Escola Superior de Tecnologia e Gestão não se responsabiliza pelas opiniões expressas neste relatório.

Agradecimentos

A minha eterna gratidão aos meus pais, Fernando e Joana, pelo esforço que tem feito por mim desde sempre. Por todo o incentivo que me deram e me impulsionaram para que eu chegasse até aqui. Por serem minhas principais fontes de inspiração.

Agradeço meus irmãos, Fábio e Fernando, que tenho o maior orgulho. Duas pessoas que me espelho e considero como exemplos. Um agradecimento especial a minha querida irmã Maria Fernanda.

Agradeço ao meu orientador Carlos Alberto Rodrigues Andrade por toda dedicação, disponibilidade e conhecimento passado.

Agradeço ao meu orientador Luiz Alberto dos Santos por toda a sua dedicação, que mesmo de longe se mostrou presente nos momentos necessários para que este trabalho fosse concluído.

Agradeço aos profissionais dos laboratórios de Química Analítica (na pessoa da Eng.^a Paula Marina), Estruturas e Resistência dos Materiais (na pessoa da Eng.^a Luisa Barreto) e a professora Margarida Arrobas do Centro de Investigação da Montanha.

Ao CEFET/RJ Campus Angra dos Reis e ao Instituto Politécnico de Bragança pela oportunidade e apoio no programa de dupla diplomação.

Agradeço ao Jean Hilário e Glauco Nobrega pelo apoio, incentivo e conhecimentos compartilhados para a elaboração e conclusão deste trabalho.

A todos meus amigos do Brasil que sempre estão me apoiando mesmo que indiretamente.

Aos meus amigos de dupla diplomação que foram minha segunda família nesse tempo, agradeço o companheirismo em todos esses meses de intercâmbio.

Aos meus amigos/irmãos Eduardo, Glauco e Samuel, por toda ajuda, dedicação e companheirismo de sempre.

Ao meu amigo Lucas Machado (*in memoriam*), que com toda certeza torce e está feliz com minhas conquistas.

A todos, meu muito obrigado! Desejo ter sido merecedor do esforço dedicado por vocês em todos os aspectos.

Resumo

O desenvolvimento de compósitos com a combinação de matrizes poliméricas reforçada com fibra de carbono e ligas com memória de forma (LMF) têm sido amplamente estudadas ao longo dos últimos anos com objetivo de, principalmente, melhorar propriedades mecânicas e controlar a forma e vibração do compósito. As LMF de Níquel e Titânio são utilizadas neste caso devido às propriedades especiais de efeito de memória de forma e superelasticidade. Neste trabalho realizou-se um estudo teórico e experimental sobre as propriedades termomecânicas, assim como, técnicas de caracterização da liga com memória de forma composta por NiTi. Para tal estudo, inicialmente fez-se análises metalográficas, uma análise por varrimento diferencial de calorimetria (DSC) e ensaios de tração a fim de se verificar respectivamente os contornos de grãos das amostras, as temperaturas de transformação de fase e propriedades mecânicas do fio de NiTiInol. Para uma análise elementar do material, realizou-se o processo de digestão atômica que apresentou resultados com diferença de, aproximadamente, 10 % comparados às informações da composição química do fornecedor do fio. Este estudo também propõe a caracterização do compósito, obtido por diferentes frações volumétricas de fios da liga de NiTiInol em uma matriz polimérica reforçada com fibra de carbono. Para caracterização realizou-se ensaios mecânicos experimentais de tração e os resultados obtidos foram comparados com as regras das Misturas de Voigt e Reuss, com um método matemático passo a passo proposto por Liu 1998 e, também, com uma simulação numérica por método dos elementos finitos (MEF) através do *software Ansys® Workbench*. As regras das mistura de Voigt e Reuss apresentaram as melhores estimativas para as propriedades do compósito híbrido estudado com erros percentuais menores que 1% em alguns casos. Os ensaios de tração mostraram que o acréscimo de fios na composição melhorou as propriedades de tensão e deformação máximas, porém concluiu-se que este aumento pode causar problemas de adesividade que faz com que os resultados caiam a medida que se aumenta a fração volumétrica de fios.

Palavras-chave: Liga com memória de forma; NiTiInol; compósito inteligente em fibra de Carbono; processos de caracterização.

Abstract

The development of composites with the combination of carbon fiber reinforced polymeric matrix and embedded shape memory alloys (SMA) has been extensively studied over the last years aiming mainly to improve mechanical properties and to control the shape and vibration of the composite. SMA composed by Nickel and Titanium are used in this case due to the special properties of shape memory effect and super elasticity. Thus, this work is a theoretical and experimental study on the thermomechanical properties and characterization techniques of the shape memory alloy composed by NiTi. Initially, for such study, a metallographic analysis, a differential scanning calorimetry (DSC) test and stress-strain tests were performed to verify, respectively, the contours grain of the samples, the phase transformation temperatures and mechanical properties of the NiTiNol wires. For an elementary analysis of the material, the atomic digestion process was performed, which showed results with a difference of approximately 10% compared to the information on the chemical composition of the wire supplier. This study also proposes the characterization of the composite, obtained by different volumetric fractions of NiTiNol alloy wires in a polymeric matrix reinforced with carbon fiber. For this characterization, experimental mechanical tensile tests were carried out and the results obtained were compared with the rules of the mixture of Voigt and Reuss, with a numerical method step by step proposed by Liu 1998 and with a numerical simulation by finite element method (FEM) through the Ansys® Workbench software. The rules of the mixture of Voigt and Reuss presented the best estimates for the properties of the hybrid composite studied with percentage errors less than 1% in some cases. The tensile tests showed that the addition of wires in the composition improved the maximum stress and maximum deformation properties, however, it was concluded that the increase in the volumetric fraction of wires can cause adhesion problems that cause the decrease of the results.

Keywords: Shape memory alloy; NiTiNol; intelligent carbon fiber composite; characterization processes.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. Considerações Iniciais	21
1.2. Objetivos.....	22
1.3. Estrutura do Projeto	23
2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO	25
2.1. Visão Geral Sobre Materiais Ativos	25
2.2. Introdução Histórica	26
2.3. Fenômenos de Transformação de Fase nas LMFs.....	26
2.3.1. Efeito com Memória de Forma (EMF).....	28
2.3.2. Superelasticidade	29
2.4. Introdução à Liga de Níquel Titânio.....	29
2.4.1. Propriedades Mecânicas	30
2.4.2. Aplicações	32
2.5. Materiais Compósitos	33
2.5.1. Matriz	38
2.5.2. Reforço.....	41
2.5.2.1. Fibras de Carbono	43
2.5.2.2. Fibras de Vidro	44
2.5.2.3. Fibras Aramídicas	45
2.6. Compósitos Híbridos	45
2.7. Processos de Fabrico de Compósitos com Fibras	48
2.8. Adesão e Interface Reforço/Matriz.....	50
2.9. Compósitos Híbridos Reforçados com LMF	51
3. METODOLOGIA	57
3.1. Caracterização da liga de Níquel-Titânio	57
3.1.2. Varrimento Diferencial por Calorimetria (DSC).....	59
3.1.3. Espectrometria de Absorção Atômica por Chama	60
3.1.4. Ensaio de Tração	63
3.2. Fabricação do Compósito Híbrido	64
3.2.1. Materiais	65
3.2.2. Equipamentos	67
3.2.3. Processos	70
3.3. Caracterização do Compósito Híbrido.....	74

3.3.1. Regras da Mistura.....	74
3.3.2. Ensaio de Tração	75
3.3.3. Modelo Matemático para Regra da Mistura em Compósitos Híbridos	77
3.3.4. Análise por Método dos Elementos Finitos (Ansys®).....	81
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
4.1. Resultado para análise metalográfica da liga de Níquel-Titânio	85
4.2. Resultado para DSC da liga de Níquel-Titânio	86
4.3. Resultado da digestão atômica da liga de Níquel-Titânio	87
4.4. Resultados para os Ensaio de Tração	89
4.5. Resultado das Regras das Misturas.....	93
4.6. Resultado do Modelo Matemático de Liu.....	97
4.7. Resultado do Método dos Elementos Finitos (Ansys®).....	98
CONCLUSÃO.....	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXO I.....	I
ANEXO II	VIII

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Temperaturas características de transformação de fase.....	27
Figura 2 - Fases cristalográficas da liga com efeito de memória de forma.....	28
Figura 3 - Diagrama de equilíbrio de fases para a liga de NiTi	30
Figura 4 - Relação tridimensional da tensão, deformação e temperatura para o comportamento mecânico das LEMF.....	31
Figura 5 – Comparação entre materiais monolíticos convencionais e materiais compósitos.....	34
Figura 6 – Importância relativa dos materiais ao longo do tempo	35
Figura 7 - Mercado dos compósitos reforçados com fibra.....	36
Figura 8 - Fases de um material compósito.....	37
Figura 9 - Classificação dos materiais compósitos.....	38
Figura 10 - Exemplos de matrizes poliméricas sintéticas.	39
Figura 11 - Imagens de compósitos reforçados com: (a) partículas aleatórias; (b) fibras curtas unidirecionais; (c) fibras curtas aleatórias; (d) fibras contínuas unidirecionais; (e) fibras contínuas tecido e (f) fibras contínuas multidirecionais.....	42
Figura 12 - Esquema dos reforços usados em compósitos reforçados com fibras	42
Figura 13 - Compósitos híbridos intercamada (a), intracamada (b) e hibridização de fibras(c).....	46
Figura 14 – Tipos de FMLs.	47
Figura 15 - Classificação dos processos de fabrico de acordo com o tipo de matriz	49
Figura 16 – Métodos e processos de integração de LMF em compósitos e propriedades que podem ser aprimoradas	52
Figura 17 – Alinhamento e método de fixação fabricados e usados no experimento de [33].	54
Figura 18 – Projeto do sistema de moldagem por pressão adaptado por [39] da máquina 5582 Instron.....	55
Figura 19 - Amostra encapsulada em material transparente.	58
Figura 20 - Esquema montado para realizar a digestão de NiTiInol em ácido clorídrico.	61
Figura 21 – Compósito híbrido com duas camadas de fibra de carbono e fios de NiTi.	65
Figura 22 – Fios de NiTi da H.E. Formgedächtnistechnik.....	65
Figura 23 – Manda de fibra de carbono disponibilizada pelo IPB.....	66
Figura 24 – Resina Poliéster e catalisador utilizados.	67
Figura 25 - Estrutura em perfis I e macaco hidráulico.....	68
Figura 26 – Conjunto de chapas base inferior e superior, respetivamente.....	68
Figura 27 – Espaçamento entre fios dependendo da configuração de fabrico	69
Figura 28 - Estrutura de prensagem do compósito híbrido com as placas montadas....	72
Figura 29 - Provetes cortados para o ensaio de tração.	75
Figura 30 – Máquina utilizada para o ensaio de tração.....	76
Figura 31 - Método passo a passo proposto por Liu	78
Figura 32 – Condições para simulação no Ansys.....	83
Figura 33 - Malha de 1 mm definida para resolução da simulação.....	83
Figura 34 - Contornos de grão da amostra “A”; b) Contornos de grão da amostra “B”. ampliação de 50x.	85

Figura 35 - Contornos de grão da amostra “C”. ampliação de 50x.....	86
Figura 36 - Resultado do DSC para amostra do fornecedor 1.....	86
Figura 37 - Resultado do DSC para amostra do fornecedor 2.....	87
Figura 38 – Gráfico das tensões máximas.....	92
Figura 39 – Gráfico das deformações máximas.....	93
Figura A 1 – Gráfico tensão-deformação 1SF.....	I
Figura A 2 - Gráfico tensão-deformação 2SF.....	I
Figura A 3 - Gráfico tensão-deformação 3SF.....	II
Figura A 4 - Gráfico tensão-deformação 4SF.....	II
Figura A 5 - Gráfico tensão-deformação 5SF.....	II
Figura A 6 - Gráfico tensão-deformação 1C1F.....	III
Figura A 7 - Gráfico tensão-deformação 2C1F.....	III
Figura A 8 - Gráfico tensão-deformação 3C1F.....	III
Figura A 9 - Gráfico tensão-deformação 4C1F.....	IV
Figura A 10 - Gráfico tensão-deformação 5C1F.....	IV
Figura A 11 - Gráfico tensão-deformação 1C2F.....	IV
Figura A 12 - Gráfico tensão-deformação 2C2F.....	V
Figura A 13 - Gráfico tensão-deformação 3C2F.....	V
Figura A 14 - Gráfico tensão-deformação 4C2F.....	V
Figura A 15 – Gráfico tensão-deformação 5C2F.....	VI
Figura A 16 - Gráfico tensão-deformação 1C3F.....	VI
Figura A 17 - Gráfico tensão-deformação 2C3F.....	VI
Figura A 18 - Gráfico tensão-deformação 3C3F.....	VII
Figura A 19 - Gráfico tensão-deformação 4C3F.....	VII
Figura A 20 - Gráfico tensão-deformação 5C3F.....	VII
Figura A 21 - Gráfico da evolução módulo de elasticidade e o módulo de corte de acordo com o número de interações para a configuração com 2 camadas de fibra de carbono e 1 fio de Nitinol.....	VIII
Figura A 22 - Gráfico da evolução módulo de elasticidade e o módulo de corte de acordo com o número de interações para a configuração com 2 camadas de fibra de carbono e 2 fio de Nitinol.....	IX
Figura A 23 - Gráfico da evolução módulo de elasticidade e o módulo de corte de acordo com o número de interações para a configuração com 2 camadas de fibra de carbono e 3 fios de Nitinol.....	IX

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas da liga de NiTi [21].....	32
Tabela 2 – Propriedades das resinas termoendurecíveis	40
Tabela 3 – Propriedades de tipos de fibras de carbono	44
Tabela 4 – Propriedades de vários tipos de fibra de vidro.....	45
Tabela 5 – Propriedades de tipos de fibras aramídicas.....	45
Tabela 6 - Tabela resumo dos critérios de escolha de processos de fabrico.....	50
Tabela 7 - Composição da liga Níquel-Titânio com Afi de -10 °C.....	57
Tabela 8 - Amostras de NiTinol para digestão com as respectivas massas.....	62
Tabela 9 - Concentração final de Níquel e volume inicial correspondente.....	62
Tabela 10 - Propriedades da liga de NiTi extraídas a partir do ensaio de rotura.....	64
Tabela 11 - Composição química da liga de NiTi, Af = -10°C.	66
Tabela 12 - Dimensões dos provetes sem fios de NiTinol.	73
Tabela 13 - Dimensões do provete com 1 fio de NiTinol.....	73
Tabela 14 – Dimensões dos provetes com 2 fios de NiTinol.	73
Tabela 15 - Dimensões dos provetes com 3 fios de NiTinol.....	73
Tabela 16 - Recomendação de geometrias das amostras de tração ASTM	76
Tabela 17 - Forças utilizadas para a simulação.	83
Tabela 18 - Amostras e respectivos ácidos/soluções acidas testadas para digestão.....	87
Tabela 19 - Perda de massa em cada amostra após 24 horas mergulhadas nas respectivas soluções.....	88
Tabela 20 - Resultado do percentual de Níquel obtido pela digestão atômica.....	88
Tabela 21 - Resultados para o ensaio de tração SF.	89
Tabela 22 – Resultados para o ensaio de tração C1F.	90
Tabela 23 - Resultados para o ensaio de tração C2F.....	90
Tabela 24 - Resultados para o ensaio de tração C3F.....	91
Tabela 25 – Resultados para o ensaio de tração de Muralidharan.....	93
Tabela 26 – Resultado para as regras das misturas do compósito com 1 fio de NiTi. .	94
Tabela 27 - Resultado para as regras das misturas do compósito com 2 fios de NiTi. .	94
Tabela 28 - Resultado para as regras das misturas do compósito com 3 fios de NiTi. .	95
Tabela 29 – Erros percentuais C1F.....	95
Tabela 30 – Estimativa da deformação máxima pelas Regras da Mistura.	96
Tabela 31 - Resultados do módulo de elasticidade e módulo de corte obtidos através do método elaborado por Liu.....	97
Tabela 32 - Desvio percentual dos resultados encontrados por MEF em relação aos dados obtidos experimentalmente nos ensaios de tração.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Símbolos latinos

<i>A</i> ₋	Austenite
<i>a</i>	Raio da fibra
<i>b</i>	Raio da matriz
<i>C</i> ₋	Concentração
CV	Varição amostral
<i>d</i>	Diâmetro
<i>E</i> ₋	Módulo de elasticidade longitudinal
<i>e</i>	Espessura
<i>f</i>	Valor volumétrico fracionário
<i>G</i>	Módulo de corte
<i>K</i>	Módulo volumétrico
<i>l</i>	Comprimento
<i>M</i> ₋	Martensite
<i>N</i>	Número de interações
<i>n</i>	Número de amostras
<i>P</i>	Carga Aplicada
<i>S</i> ₋	Desvio padrão
<i>St</i> ₋	Seção Transversal
<i>T</i> ₋	Temperatura
<i>V</i> ₋	Razão volumétrica
<i>Vol</i> ₋	Volume

Subscritos

<i>ch</i>	Compósito Híbrido
<i>co</i>	Compósito
<i>con</i>	Convencional
<i>d</i>	Temperatura mais alta a qual a martensite pode ser induzida por tensão
<i>fi</i>	Fibra
<i>f</i>	Final

<i>i</i>	Inicial
<i>if</i>	Interfacial
<i>j</i>	Posição da propriedade medida
<i>m</i>	Matriz
<i>o</i>	Original
<i>r</i>	Reforço
<i>s</i>	<i>Start</i> (Inicial)
<i>x</i>	Direção longitudinal
<i>xy</i>	Plano perpendicular à fibra
<i>y</i>	Direção perpendicular

Sobrescritos

(–)	Média da amostra
([⊥])	Direção perpendicular
<i>n</i>	Número de amostras

Símbolos Gregos

σ	Tensão
ϵ	Deformação
τ	Resistência ao corte
Δl	Variação do comprimento

Abreviaturas

ARALL	<i>Aramid Fiber Reinforced Aluminium Laminate</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C1F	Com 1 Fio
C2F	Com 2 Fios
C3F	Com 3 Fios

CARALL	<i>Carbon Fiber Reinforced Aluminium Laminate</i>
CFPR	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
CMC	Compósito de matriz cerâmica
DSC	<i>Differential Scanning Calorimeter</i> (Varredura diferencial de calorimetria)
EMF	Efeito de Memória de Forma
EsTiG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança
FAAS	<i>Flame Atomic Absorption Spectrometry</i> (Espectrometria de Absorção Atômica por Chama)
FMLs	<i>Fiber Metal Laminates</i>
GLARE	<i>Glass Fiber Reinforced Aluminium Laminate</i>
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> (Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação)
LMCM	Laboratório de materiais de Construção Mecânica
L(E)MF	Ligas com (efeito de) memória de forma
LERM	Laboratório de Ensaios de Resistência Mecânica
MEF	Método de elemento finito
MMC	Compósito de matriz metálica
NiTi	Níquel-Titânio
PAN	Poliacritonitrilo
PMC	Compósito de matriz polimérica
Ppm	Parte por milhão
SE	Superelasticidade
SMA	<i>Shape Memory Alloy</i> (Liga de memória de forma)

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

As Ligas com efeito de Memória de Forma (LMF) compõem um grupo de materiais que apresentam duas principais características que os distinguem dos demais, que são: o efeito de memória de forma (EMF) e/ou a superelasticidade (SE). De forma sucinta, podemos definir o EMF como a capacidade do material em recuperar deformações aparentemente plásticas através do aquecimento até uma temperatura adequada, esta recuperação está relacionada com a transformação de fase reversa da martensite em austenite no aquecimento. Para o caso da SE, a recuperação de forma está relacionada com a transformação reversa da martensite induzida mecanicamente para a austenite após o descarregamento de uma determinada tensão.

Ligas metálicas como In-Tl, Cu-Zn, Cu-Al-Ni, NiTi, entre outras, são ligas que apresentam as propriedades anteriormente descritas. As ligas de níquel/titânio (NiTi) apresentam um dos maiores desempenhos para o EMF e a SE, apresentando uma recuperação total de até, aproximadamente, 9% após deformação [1],[2]. A liga equiatômica de Ni e Ti, também conhecida como NiTi₂inol, foi descoberta em 1960 por Buheler e Wiley no *Naval Ordnance Laboratory* (razão do sufixo “*inol*”) quando buscavam encontrar um material para fabricar o cone de nariz de um míssil naval. Além dos efeitos considerados especiais, as ligas de NiTi possuem propriedades de alta resistência à fadiga, ao impacto e à deformação, baixa densidade, resistência térmica e uma alta capacidade de amortecimento na fase martensítica. Desta forma, têm sido motivo de estudos e atualmente já estão presentes em aplicações nas indústrias aeroespacial, naval, automobilística, robótica, biomédica, nuclear, entre outras [3], [4].

Os materiais compósitos são formados a partir da combinação de dois ou mais materiais com propriedades físicas e químicas distintas, que quando combinados resultam em um produto com propriedades superiores a qualquer um dos constituintes utilizados individualmente [5]–[7]. Os compósitos híbridos representam um produto onde se utilizam três ou mais elementos em sua composição. A origem dos compósitos híbridos aumentou a aplicabilidade dos compósitos na obtenção de diferentes propriedades para as mais diversas aplicações [8].

Os compósitos híbridos com LMF ainda requerem muitos estudos sobre o tema, sobretudo em testes a fim de que seja possível mapear e, conseqüentemente, prever as propriedades desse material de acordo com as propriedades dos constituintes. A dificuldade em se prever o comportamento está no facto de que pequenas variações na composição química da liga, na ordem de 0,01%, já influenciam em sua temperatura de transição de fase. Ressalta-se que cada fase possui propriedades distintas, logo é fundamental estudar a relação da composição e propriedades mecânicas para que no futuro estes compósitos híbridos com LMF estejam mais presentes nas indústrias com propriedades ainda não obtidas na engenharia ou, se já obtida, por menores preços ou menores quantidades. Neste trabalho é realizado o estudo e fabrico de um compósito híbrido formado por fios de NiTi embebidos em uma matriz polimérica reforçado com fibra de carbono.

1.2. Objetivos

O objetivo desta dissertação consiste no estudo e fabrico de compósitos híbridos com matriz de poliéster reforçado com fibra de carbono e diferentes frações volumétricas de fios de NiTi. Pretende-se obter propriedades mecânicas do compósito e, por fim, comparar os resultados encontrados nos testes experimentais com os resultados obtidos pelas regras das misturas, por um modelo matemático e por métodos de elementos finitos. A fim de se alcançar o objetivo geral, divide-se em objetivos específicos algumas atividades que devem ser realizadas para a conclusão do trabalho:

- Definir os principais tópicos sobre ligas com memória de forma e compósitos;
- Realizar análise metalográfica sobre fios de NiTi de diferentes diâmetros e fabricantes;
- Realizar análise sobre as temperaturas de transformação características dos fios (DSC);
- Realizar análise química sobre a composição química do fio de NiTi;
- Adaptar a estrutura para o fabrico do compósito híbrido composto por diferentes frações volumétricas de fios de NiTi embebidos em uma matriz polimérica reforçado com fibra de carbono;
- Simulação numérica do compósito para um ensaio de tração;
- Ensaio de tração do compósito de acordo com a norma ASTM D3039/D3039M-17.

- Comparar resultados obtidos através de modelos matemáticos com os dados obtidos experimentalmente;
- Levantar as possibilidades de trabalhos futuros, abrangendo as tarefas que não foram possíveis de se realizar neste presente estudo, assim como os novos caminhos que se abrem a partir desta tese.

1.3. Estrutura do Projeto

A estrutura da presente dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial – ramo Engenharia Mecânica está baseada nas Normas e Regulamentos dos Mestrados do Instituto Politécnico de Bragança, e contém os seguintes elementos pré-textuais, textuais e pós textuais. Os elementos pré-textuais são agradecimentos, resumo do trabalho em língua portuguesa e em língua inglesa, índice, lista de figuras, lista de tabelas, e abreviações. Os elementos textuais foram divididos em cinco capítulos:

O Capítulo 1 é responsável por apresentar a introdução do tema, a significância do estudo, o objetivo do trabalho e como o mesmo está organizado.

No capítulo 2, será feita uma revisão bibliográfica sobre os principais assuntos deste trabalho. Será apresentado informações acerca das principais características das ligas com memória de forma, uma introdução histórica sobre o tema e aplicações desta classe de materiais. Além disso será abordado alguns fundamentos relevantes sobre materiais compósitos para compreensão do trabalho.

No capítulo 3, serão apresentados os materiais e métodos utilizados para realização dos experimentos e fabrico dos compósitos. Neste capítulo serão explicados de forma sucinta cada um dos testes realizados pelo autor e colaboradores.

No capítulo 4, serão apresentados os resultados obtidos com os experimentos realizados. Além de apresentados, os resultados também serão discutidos para validação e entendimentos do que foi encontrado.

No capítulo 5, serão apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

E por fim são apresentadas as referências bibliográficas.

Os elementos pós-textuais encontram-se ao final do documento e são compostos pelos Anexos I e II.

2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

2.1. Visão Geral Sobre Materiais Ativos

O campo da ciência dos materiais tem evoluído de forma crescente nos últimos tempos devido, principalmente, aos avanços da ciência e tecnologia na compreensão dos efeitos da microestrutura e técnicas de processamento do comportamento do material. O estudo por novas ligas e compósitos mais leves, fortes e com boas propriedades materiais (mecânica, térmica, elétrica etc.) que atendem aos mais rigorosos requisitos estruturais e permitem uma grande variedade de aplicações, gerou um novo ramo de materiais chamados materiais multifuncionais. Os materiais ativos exibem recursos que os fazem serem utilizados como sensores e/ou atuadores em estruturas denominadas inteligentes e são objeto de diversos estudos onde estes têm a capacidade de alterar sua forma, rigidez, frequência natural, dentre outras propriedades mecânicas mediante a aplicação de campos elétricos, eletromagnéticos, de temperatura ou de tensão [9]. Como exemplo de materiais ativos, pode-se destacar: os piezemagnéticos, piezoelétricos e aqueles com memória de forma [10].

Mais especificamente, os materiais com memória de forma também são conhecidos como materiais inteligentes; ou melhor, materiais que apresentam acoplamento de múltiplos domínios físicos. Isto significa que quando submetido a variações de propriedades não mecânicas estes materiais podem manifestar mudanças em propriedades mecânicas [10].

Materiais com memória de formas, de maneira geral, são caracterizados pela habilidade de, após serem submetidos a uma deformação aparentemente plástica, recuperarem a sua forma original através de um estímulo apropriado, o que caracteriza o chamado efeito de memória de forma (EMF). Entre os materiais com memória de forma, as ligas com memória de forma (LMF) possuem ampla aplicação em diferentes áreas do conhecimento, de entre as quais destacam-se a indústria aeroespacial, biomédica e automóvel [10], [11].

2.2. Introdução Histórica

Um dos maiores avanços para a descoberta das ligas com a memória de forma aconteceu na década de 1890, onde foi descoberto a martensite nos aços. Porém, os estudos mais específicos sobre ligas memória de forma começaram a ser realizados em 1932 por A. Ölander. Este autor, que trabalhou com ligas de Ouro e Cádmio, pôde constatar a reversibilidade da transformação da liga por observação metalográfica e através do registro da variação da resistividade. Greninger e Mooradian (1938), descendo e subindo a temperatura de ligas de Cobre e Zinco, observaram a formação e desaparecimento de martensite, respectivamente. O efeito de memória de forma foi posto em evidência por Kurdjumov & Khandros (1949) e, depois, também por Chang e Read (1951) numa barra de Ouro e Cádmio. Kurdjumov e Khandros, em 1949, introduziram o conceito da transformação termoelástica da martensite baseados em observações experimentais sobre a estrutura martensítica termicamente reversível nas ligas de CuZn e CuAl. Esta transformação, que anteriormente estava estabelecida como um processo irreversível, foi demonstrada em outras ligas anos posteriores a descoberta. Entretanto, só em 1962 foi observado a recuperação de deformações consideráveis. Buehler e colaboradores, em uma investigação sobre materiais úteis para blindagem térmica descobriram a liga NiTi, que além de apresentar boas propriedades mecânicas, comparáveis a alguns materiais de engenharia, o material também apresentava uma capacidade de recuperação de forma. Em homenagem, foi acrescentado à nomenclatura da liga NiTi um sufixo NOL que representa o laboratório de armamento naval (*Naval Ordnance Laboratory*). O termo efeito de memória de forma foi dado ao comportamento de recuperação de forma. A partir deste estudo a comunidade científica despertou interesse nas LMFs, devido, principalmente, aos aspectos metalúrgicos e potenciais aplicações práticas das ligas [10], [12]. Devido à sua alta capacidade em recuperar forma e boa biocompatibilidade, as ligas de NiTi ganharam grande importância e destacam-se no cenário mundial juntamente com as ligas de Ferro e ligas de Cobre [11].

2.3. Fenômenos de Transformação de Fase nas LMFs

Semelhante a outros metais e ligas, as ligas com efeito de memória de forma são polimórficas, isto é, apresentam duas (ou mais) estruturas cristalinas (ou fases), onde o efeito de memória de forma é relacionado à reversão cristalográfica entre as fases do material sem que ocorra difusão atômica. Desta forma, a temperatura e a tensão externa

aplicada são fatores que determinam a estrutura cristalográfica ou fase em uma LEMF [13]. Austenite é a fase presente em altas temperaturas e apresenta estrutura cristalina cúbica. A martensite, fase presente em baixas temperaturas, geralmente, apresenta estrutura cristalina tetragonal, ortorrômbica ou monocíclica. De forma simplificada, pode-se dizer que as peculiaridades das propriedades destas ligas estão relacionadas com a reversibilidade da transformação de fase martensite, isto é, o processo de transformação dos sólidos entre uma fase cristalograficamente mais ordenada, austenite, e uma fase cristalograficamente menos ordenada, a martensite. Cristais martensíticos podem apresentar diferentes condições de orientação, chamadas variantes. Utiliza-se o termo martensite maclada quando várias variantes martensíticas estão auto acomodadas e martensite não maclada quando há a presença de uma variante dominante. A transformação de fases ocorre apenas através da distorção da rede cristalina, não ocorrendo por difusão atômica. A reversibilidade da transformação de fase da austenite para martensite e vice-versa, representa a base do comportamento das LMF [12].

Existem quatro temperaturas características associadas às transformações de fase, a Figura 1 ilustra o processo e as temperaturas. A transformação direta, austenite-martensite, sem aplicação de cargas, começa sua mudança na temperatura inicial martensítica (M_s ou M_i) e se transforma por completo em martensite quando atinge a temperatura final martensítica (M_f). De forma semelhante acontece na transformação reversa, a mudança martensite-austenite tem início na temperatura inicial austenítica (A_s ou A_i) e a transformação é completa quando se atinge a temperatura final austenítica (A_f). Além dessas ilustradas, pode-se destacar a M_p (temperatura de pico da transformação martensítica) e a A_p (temperatura de pico da transformação martensítica reversa). As temperaturas de transformação dependem da composição química da liga [14].

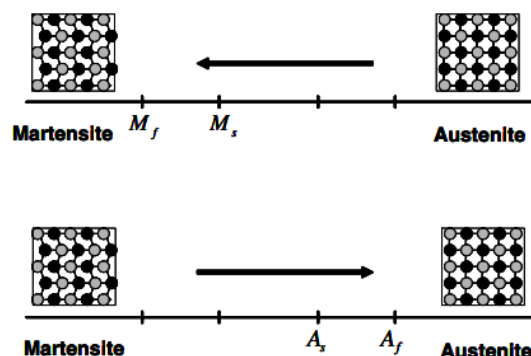


Figura 1 - Temperaturas características de transformação de fase

Na Figura 2 é apresentado esquematicamente o fenômeno do EMF e superelasticidade. Em altas temperaturas, a liga de NiTi é estável na fase autênica com propriedades que são similares a grande parte das ligas de titânio. A liga de NiTi quando arrefecida abaixo da temperatura de M_f possui propriedades termomecânicas completamente diferentes da fase de alta temperatura, uma vez que é dotada de uma nova estrutura cristalina (martensite maclada) [15].

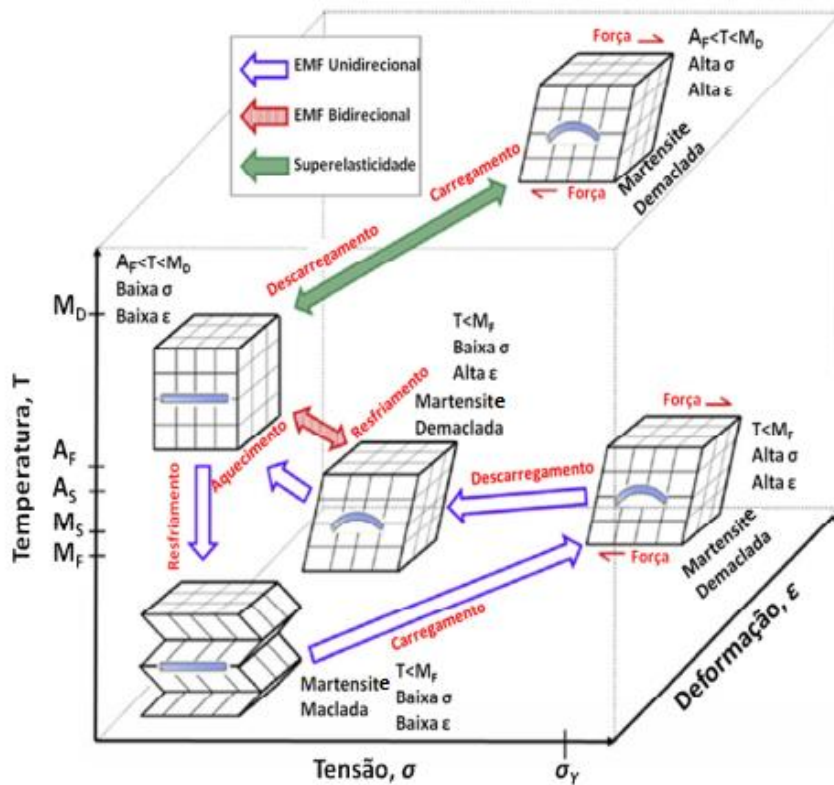


Figura 2 - Fases cristalográficas da liga com efeito de memória de forma [14].

2.3.1. Efeito com Memória de Forma (EMF)

Define-se o EMF como a capacidade de certos materiais recuperarem a forma com o aquecimento para temperaturas acima da temperatura de fim de transformação da martensite em austenite após serem deformados no estado martensítico. Geralmente, o arrefecimento posterior não faz o material retornar ao estado deformado. Esse tipo é conhecido como liga com efeito de memória de forma unidirecional (do inglês, *one way shape memory effect*), onde o EMF pode ser considerado irreversível no sentido de que somente com uma nova deformação no estado martensítico e posterior aquecimento acima de A_f que forma um novo ciclo. Existem também ligas com efeito de memória de

forma bidirecional (do inglês, *two way shape memory effect*) onde o material estica quando ocorre a transformação austenite-martensite (arrefecimento) e encurta quando ocorre a transformação inversa martensite-austenite (aquecimento) podendo repetir o processo a cada ciclo. Essas ligas com memória de forma bidirecional só são possíveis a partir de um condicionamento ou treinamento que acabam por diminuir pela metade a capacidade de tensão de recuperação em comparação à unidirecional, tornando-a menos viável. Se for aplicada uma forma externa a cada ciclo, ter-se-á o efeito de memória de forma bidirecional forçado [10], [15], [16].

2.3.2. Superelasticidade

O fenômeno da superelasticidade é um caso particular do EMF. Este pode ser definido como a capacidade do material em recuperar a forma (entre 8 e 10% para liga de NiTi) sem que seja aquecido quando deformado além do limite elástico, após ter um carregamento removido [1], [2], [15]. Neste fenômeno a deformação é acompanhada de uma transformação de fase da austenite em martensite mecânica e, após o alívio da carga de deformação ocorre a recuperação da forma acompanhada da transformação reversa, indicando que a martensite induzida é termodinamicamente instável em uma liga austenítica [3].

2.4. Introdução à Liga de Níquel Titânio

As ligas de NiTi representam uma das mais importantes ligas da classe de materiais que possuem o efeito de memória de forma. Além do EMF e SE, propriedades como a biocompatibilidade, a alta resistência à corrosão, à fadiga e à deformação e alta capacidade de amortecimento na fase martensítica despertam um crescente interesse no estudo e em possíveis aplicações da liga [4], [14]. O NiTiNol tem ainda um preço inferior quando comparado à outras LMF que podem conter Ouro, Prata e Platina em suas composições [17].

O diagrama de equilíbrio de fases para a liga de NiTi, Figura 3, mostra que pequenas mudanças na composição química de uma liga equiatômica podem conduzir à formação de fases adicionais como Ti_2Ni e $TiNi_3$ que anulam o efeito de memória de forma [16]. Para mais, outro ponto fundamental desta liga é que a diferença de 1% na composição resulta em uma diferença de 100°C na temperatura de transformação de fase [18]. Mais especificamente, tem-se que quanto maior a quantidade de níquel menores são

as temperaturas de transformação [3]. Fatores como o histórico de tratamentos térmicos e esforços mecânicos também alteram a temperatura de transição [19].

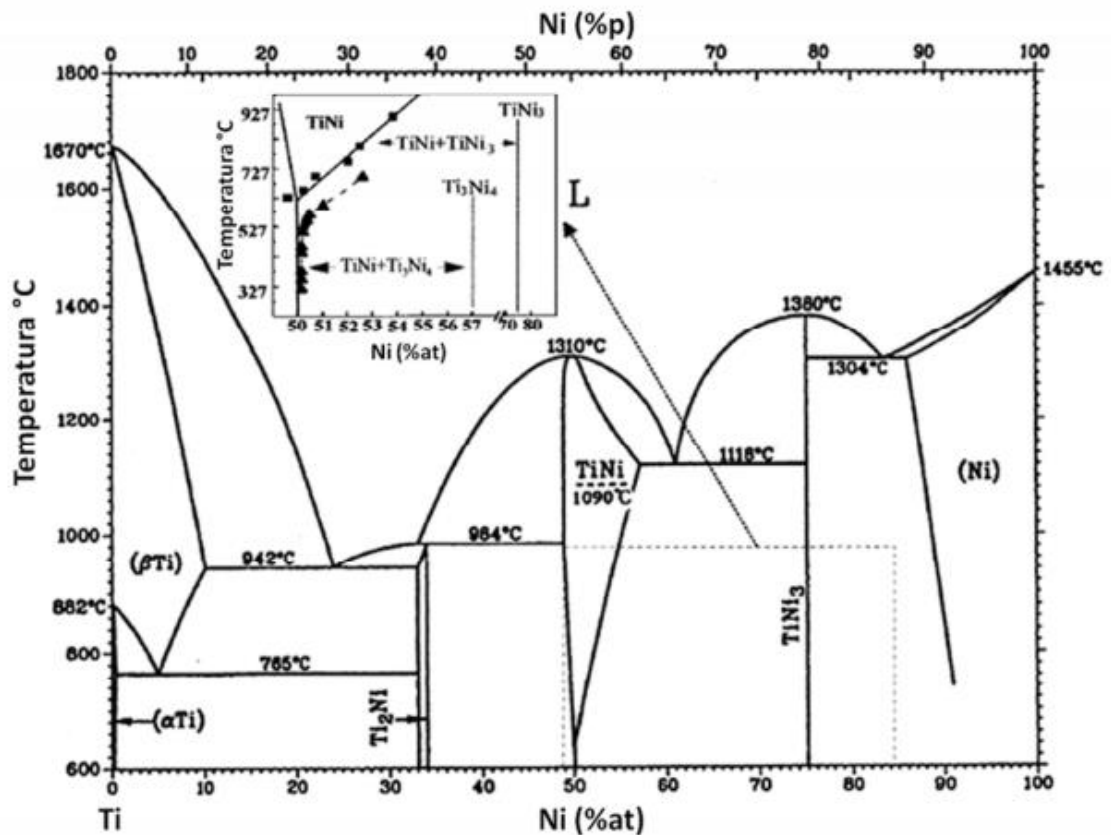


Figura 3 - Diagrama de equilíbrio de fases para a liga de NiTi [14].

Apesar do crescente estudo nesta liga, os principais limitadores para muitas aplicações estão na dificuldade em maquinar e soldar. Tratamentos térmicos indesejados que alterem as propriedades mecânicas e à contaminação química ao qual estão suscetíveis nos processos de soldadura são os problemas encontrados. Atualmente, a soldadura a LASER (*light amplification by stimulated emission of radiation* ou amplificação da luz por emissão estimulada de radiação) apresentou os melhores resultados e é a mais recomendada para a liga [20].

2.4.1. Propriedades Mecânicas

A liga de NiTi é considerada uma liga termoelástica, isto é, possui comportamento mecânico dependente da tensão, da deformação e, também, da temperatura como pode ser observado na Figura 4. Devido à propriedade termoelástica da liga, ao se diminuir a

temperatura tem-se o aumento da tensão interna devido ao crescimento de placas martensíticas que contribui para formação do EMF e SE a diferentes temperaturas [16].

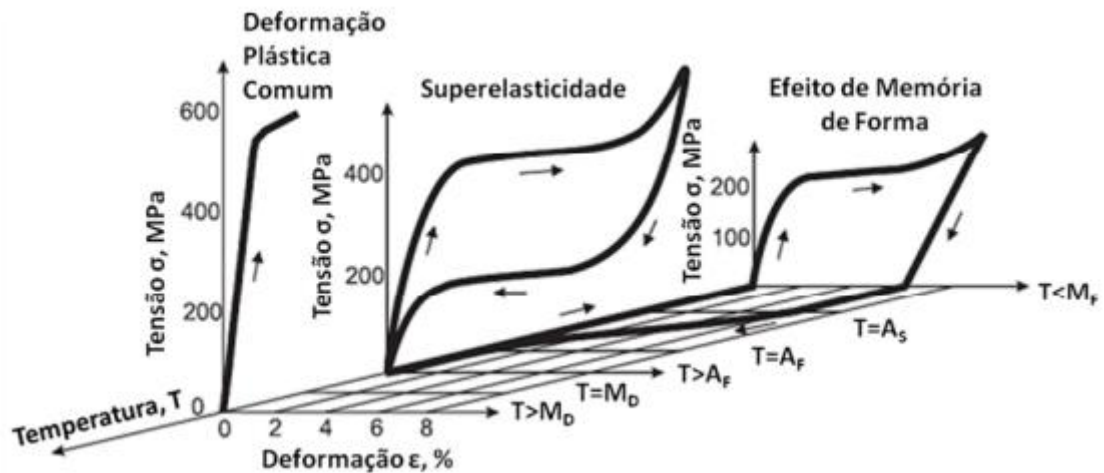


Figura 4 - Relação tridimensional da tensão, deformação e temperatura para o comportamento mecânico das LEMF [14].

Como se pode analisar na figura acima, a liga NiTi também pode apresentar uma deformação plástica comum, para isto acontecer a liga deve ser deformada em uma temperatura acima de M_D , onde a tensão para induzir a transformação martensítica se encontra acima da tensão crítica de deslizamento da interface martensite-martensite, resultando em uma deformação plástica permanente [16].

O efeito de histerese, também observado na Figura 4, é uma característica importante da liga. As temperaturas na qual a histerese é obtida indicam o intervalo no qual os fenômenos do EMF e SE são válidos. Desta forma, pode-se dizer que esta histerese deve ser menor em aplicações onde se pretende atuação rápida e maior quando se trata de estruturas ou tubulações [15].

Algumas propriedades como o módulo de elasticidade, resistividade elétrica, condutibilidade térmica e coeficiente de expansão térmica, também variam de acordo com a fase em que a liga se encontra. Na fase austenítica a liga é mais dura e tem o módulo de Young mais elevado, enquanto na fase martensítica o material é mais macio e maleável [15], como observa-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas da liga de NiTi [21]

	NiTi	
	Austenítica	Martensítica
Resistência a tração [MPa]	800-1500	103-1100
Tensão de escoamento [MPa]	100-800	50-300
Módulo de elasticidade [GPa]	70-110	21-69
Alongamento na ruptura [%]	1-20	<60

As desvantagens em relação às propriedades da liga estão na pequena tensão elástica, baixa frequência de atuação, baixa capacidade de controle, são pouco precisas, apresentam dificuldade em dissipar calor e baixa eficiência energética [15].

2.4.2. Aplicações

As ligas de NiTi além de apresentarem melhores propriedades mecânicas em comparação com outras LMFs, são mais baratas, fáceis e seguras de manipular. Em razão destas vantagens que as LMF, sobretudo as ligas de NiTi, se tornaram potencialmente comercializáveis. A primeira aplicação comercial aconteceu em 1969 no tubo CryoFit™ utilizado em caças F-14 construídos pela *Grumman Aerospace Corporation* e, logo em seguida, em 1971, George B. Andreasen utilizou-se da liga em fios ortodônticos. Este último é aplicado até os dias atuais. Desde a década de 80, a aplicação comercial das ligas de NiTi tem se desenvolvido nas mais diversas áreas devido à demanda por atuadores mais leves e compactos, especialmente no setor biomédico [15].

Apesar da liga de NiTi ser significativamente mais cara que os aços inoxidáveis, elas apresentaram um excelente comportamento para aplicações biomédicas devido à elevada resistência à corrosão, biocompatibilidade, propriedades físicas únicas que se equiparam com as dos tecidos e ossos humanos e podem ser fabricados para responder e mudar conforme a temperatura do corpo. Na área médica as LMFs podem ser encontradas em equipamentos e dispositivos em muitos campos, incluindo ortopedia, neurologia, cardiologia e radiologia intervencional. A grande oportunidade para o maior sucesso comercial das ligas de NiTi na área médica está na necessidade de instrumentos em miniatura que sejam precisos e confiáveis para tratamentos médicos complexos e procedimentos cirúrgicos [15]. Como exemplo pode-se destacar a fabricação de *stents*, a

fabricação de fios para aparelhos ortodônticos, na área endodôntica para a fabricação de brocas e até mesmo armações para óculos [14].

Na área aeroespacial onde os materiais são submetidos a cargas dinâmicas elevadas e tem restrições quanto à geometria, as propriedades únicas das LMF tiveram um maior interesse em aplicações após o sucesso do tubo CryoFit™ para acoplamento de linhas hidráulicas no caça F-14. Alguns exemplos de aplicação das LMF nesta área atualmente são atuadores, conectores estruturais, amortecedores de vibração, selantes, manipuladores, dentre outros [15].

Em veículos modernos, o aumento da demanda por segurança e conforto alinhados com um melhor desempenho do veículo faz com que seja necessário um maior número de sensores e atuadores. E é exatamente nestes componentes que se encontra a maior oportunidade para utilização das LMFs como alternativa para atuadores eletromagnéticos. A simplicidade mecânica e compactidade dos atuadores fabricados a partir de LMF reduzem significativamente em tamanho, peso e custo alguns componentes automotivos, além de proporcionar benefícios de desempenho em comparação com os atuadores convencionais. No entanto, as aplicações não se restringem apenas a isto podendo expandir-se para áreas como aerodinâmica e aplicações estéticas [15].

Na área de engenharia civil, a liga pode ser utilizada como agentes de controle ativo, semiativo, passivo em estruturas sujeitas a vibração [17], [20]. A combinação de cristais piezelétricos que são capazes de determinar a vibração e o NiTiNol que é capaz de neutralizar a mesma, abre um leque de possibilidades no controle vibracional até mesmo de equipamentos mecânicos [15], [22].

Constata-se o grande interesse de importantes setores industriais em investir na tecnologia das LMFs, especialmente nas ligas de NiTiNol, visto que se trata de um mercado promissor, altamente lucrativo e grande contribuição para o setor aeronáutico [14]. Para o futuro espera-se novos estudos que melhorem as propriedades e busquem ampliar o mercado de aplicação destas ligas [15].

2.5. Materiais Compósitos

Atualmente existem milhares de materiais disponíveis para a concepção e fabrico de produtos para as mais diversas aplicações. Estes materiais, que variam dos mais

comuns disponíveis há centenas de anos até os que foram recentemente descobertos, podem ser divididos em quatro categorias principais: metais, plástico, cerâmicos e materiais compósitos [6]. Os materiais compósitos, foco deste capítulo, são geralmente utilizados com o objetivo de se obter componentes de elevada leveza e resistência estrutural. Estes podem ser classificados entre compósitos tradicionais e compósitos sintéticos. O primeiro refere-se àqueles que ocorrem na natureza ou são produzidos desde muitos anos pelas civilizações, como exemplo temos a madeira e o asfalto. Os compósitos sintéticos são aqueles fabricados pensando no contexto de produtos de engenharia associados às indústrias de manufatura, onde os componentes são produzidos de forma distintas e combinados para se obter a estrutura, propriedades e a geometria desejada [5].

A Figura 5 a seguir faz uma comparação ilustrativa, entre materiais convencionais (Aço e alumínio) e os materiais compósitos em geral. Essa comparação mostra possibilidades de aprimoramento que podem ser obtidas pelo uso deste tipo de material [23].

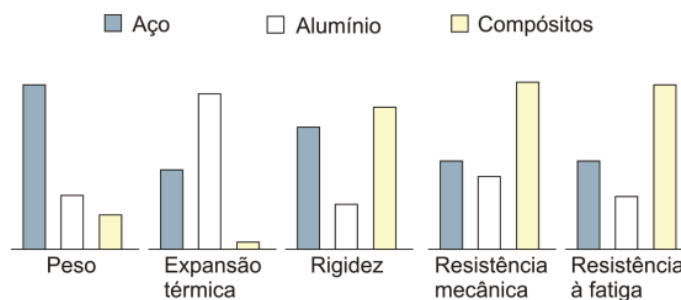


Figura 5 – Comparação entre materiais monolíticos convencionais e materiais compósitos [23].

À medida que novos estudos sobre compósitos são publicados, ocorre o crescimento e aprimoramento de novas tecnologias acerca deste material. A Figura 6 mostra a evolução dos materiais na indústria ao longo do tempo. Nota-se que a partir da década de 50 houve um aumento na utilização de polímeros, compósitos e cerâmicos. Este aumento crescente representa um equilíbrio na utilização dos mais diversos tipos de materiais.

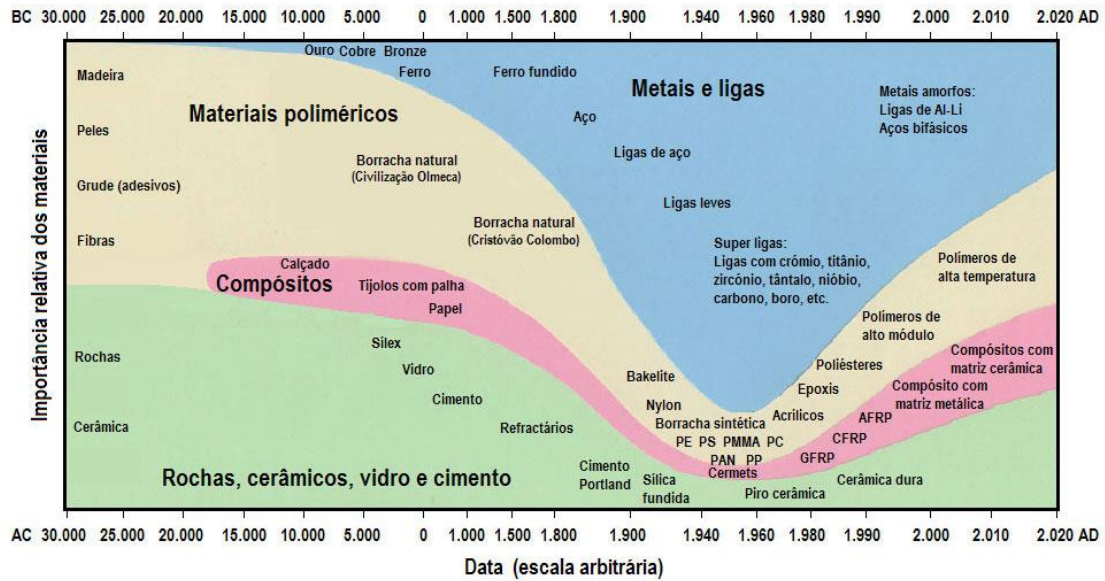


Figura 6 – Importância relativa dos materiais ao longo do tempo [24].

Através do princípio da ação combinada, os materiais compósitos são formados a partir de dois ou mais materiais com propriedades físicas e químicas nitidamente distintas, que quando combinados resultam em um produto com propriedades superiores a qualquer um dos constituintes utilizados individualmente. Segundo Mazumdar [6], a definição acima é geral e pode incluir metais, ligas de co-polímeros de plástico, minerais e madeira. Desta forma, diferencia-se os materiais compósitos reforçados com fibras destes citados acima através dos materiais constituintes, que são diferentes a nível molecular e são mecanicamente separáveis [7].

Grandes avanços tecnológicos, referentes às aplicações na área aeronáutica, aeroespacial, petroquímica, naval, bioengenharia, automobilística, construção civil, energia eólica e artigos esportivos, dentre outras, fizeram com que a exigência aos materiais comuns mudasse, o que trouxe os compósitos como resposta à essas novas necessidades já que os mesmos apresentam, praticamente, infinitas possibilidades de combinação de materiais que permitem atender às mais diversas aplicações [7], [8], [25]. A Figura 7 abaixo mostra os diferentes mercados e suas respectivas proporções em relação à utilização de materiais compósitos reforçados com fibras. Destaca-se o mercado aeroespacial e de aeronaves que, apesar de elevada importância na origem e no avanço dos compósitos, representa apenas 1% [25].

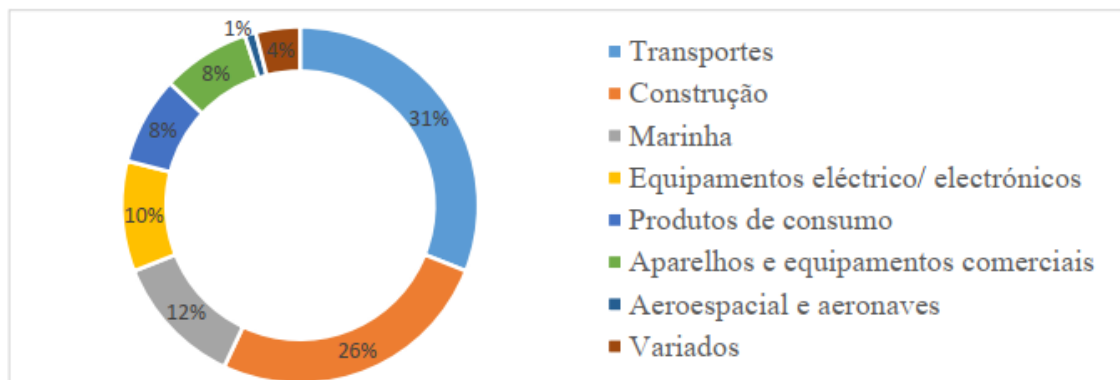


Figura 7 - Mercado dos compósitos reforçados com fibra [26].

Atualmente, a utilização deste tipo de material tem assumido uma grande importância na indústria em geral [8]. Nota-se o mercado de materiais compósitos cada vez mais difundidos, especialmente em produtos onde o rendimento e desempenho são fundamentais. A relação entre o módulo de elasticidade, resistência à tração e a densidade traz uma grande vantagem dos materiais compósitos frente aos materiais comuns, uma vez que estes “novos” materiais apresentam uma excelente relação resistência/peso ou rigidez/peso. Outras propriedades como a resistência à corrosão e à oxidação dos materiais, resistência ao choque e ao desgaste por abrasão, entre outras, reforçam os compósitos como uma opção bastante atrativa [26]. Por outro lado, também existem desvantagens e limitações que são: as propriedades de muitos compósitos importantes são anisotrópicos, isto é, as propriedades se diferem dependendo da direção no qual são medidos; materiais compósitos são geralmente caros, apesar de que este valor pode cair com o aumento do volume de compra; e alguns métodos de fabricação para moldar materiais compósitos são lentos e dispendiosos [5].

Nos compósitos podemos diferenciar duas fases: uma chamada de reforço (ou fase dispersa), geralmente na forma filamentar, que confere as propriedades mecânicas e estruturais do material. E outra fase chamada matriz (fase aglutinante), que representa o componente de menor rigidez e fragilidade estrutural, porém, confere forma à estrutura e serve de elemento de coesão do material onde os reforços transferem esforços mecânicos entre si e trabalham de forma integrada e sinérgica. Além destas, pode surgir uma terceira fase, conhecida como interface, devido principalmente às interações químicas ou efeitos de processos por tratamento químico pela aplicação de agente aderentes. A função da interface é promover uma melhor interação mecânica na superfície de contato entre a matriz e o reforço. Fatores como as características da matriz e do reforço, assim como o

processo de fabricação, devem ser levados em conta na escolha de um material compósito para uma determinada aplicação, pois afetam significativamente nas propriedades finais do material [5], [6], [27]. A Figura 8 ilustra as diferentes fases presentes nos materiais compósitos.

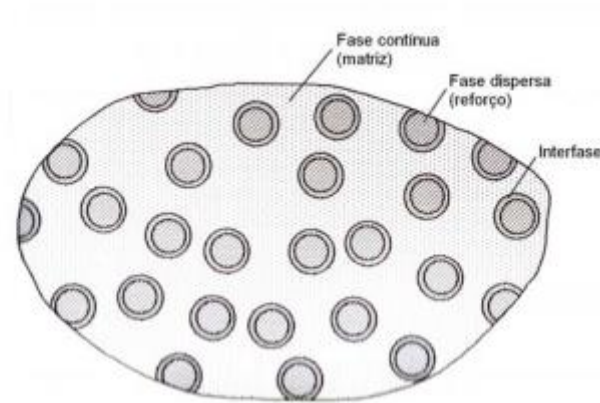


Figura 8 - Fases de um material compósito [27].

Usualmente, os materiais compósitos podem ser classificados pelo tipo de material que compõe a matriz ou reforço ao qual ele é fabricado. Porém, a classificação destes materiais pode ser interpretada de diferentes formas e varia de autor para autor na literatura do assunto. Segundo a matriz, podem ser encontrados com as seguintes designações: compósitos de matriz polimérica (PMCs), compósitos de matriz metálica (MMCs) e compósitos de matriz cerâmica (CMCs) [5]. Conforme o tipo de material de reforço utilizado, responsável por suportar de 70 até 90% das cargas do projeto [6], podem ser divididos em três grupos: os de partículas, os de fibras e os estruturais. Esses três grupos e suas subdivisões podem ser observados na Figura 9. Sendo o reforço por fibras os mais utilizados atualmente [5]–[7].

A anisotropia presente nesses materiais, torna possível o desenvolvimento de projetos otimizados, capazes de combinar as características geométricas e funcionais necessárias para um componente estrutural com as propriedades mecânicas desejadas. Por outro lado, esses materiais estão suscetíveis a sofrer danos conforme são utilizados, apresentando elevada complexidade dos modos de falha, tais como: arrancamento das fibras da matriz; formação de pontes da fibra na matriz, ou seja, descolamento de partes das fibras na matriz; fratura das fibras; falhas da matriz, etc. Isso faz com que não exista ainda um critério de resistência de uso global apto a prever o desempenho de um componente em operação [28].

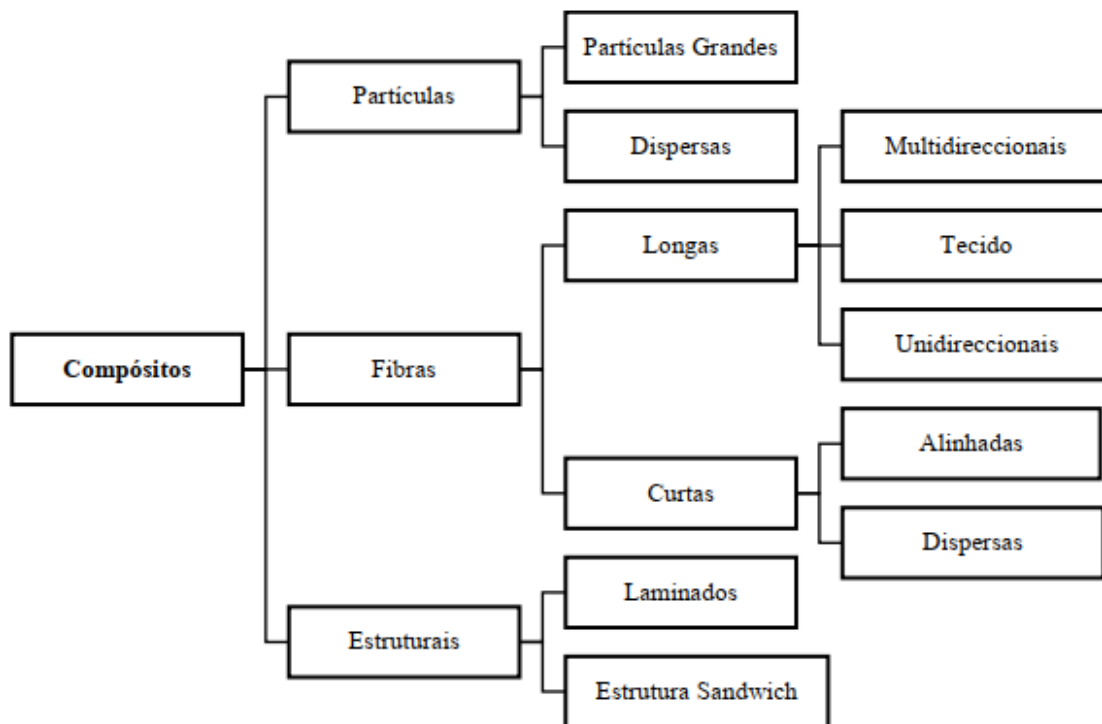


Figura 9 - Classificação dos materiais compósitos [26].

2.5.1. Matriz

A matriz é o componente do compósito que representa a fase contínua, sendo fundamental na constituição do mesmo por cumprir diferentes funções. A matriz protege o reforço em relação aos danos superficiais que ocorrem por abrasão mecânica ou reações químicas com o ambiente, estes danos que podem introduzir falhas capazes de formar trincas, que podem conduzir às falhas mesmo sob baixos níveis de tensão de tração. Para o caso de compósitos reforçados com fibras, a matriz funciona como um aderente que une todas as fibras obtendo-se em todas o mesmo comportamento, proporcionando um aumento da rigidez e resistência global do material. As propriedades do compósito são máximas na direção do reforço e vão diminuindo conforme o ângulo. Fora da direção principal, a matriz se torna a principal responsável pelas propriedades do compósito [7].

Um requisito básico para a matriz é que esta transfira as cargas impostas para o reforço de forma eficaz e a qualidade desta transferência depende diretamente da interface entre o reforço e a matriz pois esta é a principal responsável pelo desempenho do produto. A qualidade da interface depende da afinidade entre a matriz e o reforço, isto quer dizer que uma combinação de fibras com boas propriedades embebida em uma matriz também

com boas propriedades, não garante um compósito com um desempenho elevado [8]. O limite de resistência à rotura do compósito é diretamente dependente da qualidade dessa interação. Adequar essa ligação é essencial para maximizar a transmissão da tensão da matriz para as fibras.

Logo, para a escolha da matriz deve se levar em consideração fatores como a sua viscosidade, a interação reforço/resina, o custo e a capacidade de processamento. Além destas, as propriedades mecânicas, resistência à corrosão e flambagem e os métodos de processamento também devem ser analisados no início do projeto [26].

As resinas sintéticas são produzidas artificialmente por reação química, consistindo num conjunto de polímero mais os aditivos. Estas matrizes poliméricas podem ser feitas de resina termoendurecíveis ou termoplásticas. A Figura 10 mostra outras subdivisões destes dois grupos [26].

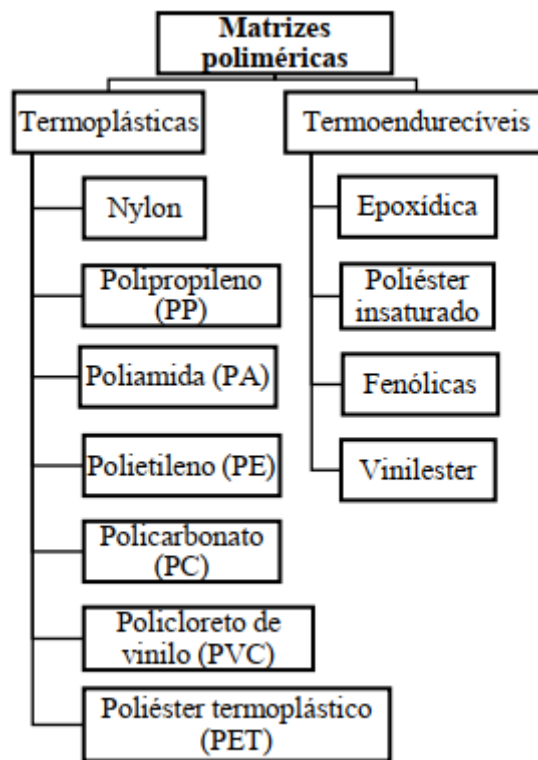


Figura 10 - Exemplos de matrizes poliméricas sintéticas [26].

Compósitos de matriz plástica apresentam baixo peso específico, boa resistência mecânica, inércia química, resistência a diversos tipos de ambientes e a possibilidade de se adicionar aditivos protetores caso seja necessário. Tendo ainda alta durabilidade e de

fácil reparação e produção, mesmo para geometrias mais complexas, sendo, muitas vezes, não apenas a melhor opção de material, mas a única [29].

O princípio do processamento dos termoplásticos ocorre por mudança de fase, em um processo totalmente reversível onde pode ser reaproveitado repetidas vezes. Neste tipo, o aquecimento causa um amolecimento progressivo até o ponto de fusão sem que ocorram modificações expressivas em suas propriedades. Já no caso dos termoendurecíveis, o endurecimento é consequência de reações químicas irreversíveis. O processamento destes ocorrem pela mistura de dois ou três componentes: resina, acelerador e catalisador. Após a mistura na proporção adequada, normalmente indicada pelo fornecedor, ocorre a formação da estrutura rígida, descrevendo o processo de “cura” [30].

As resinas mais utilizadas nos dias de hoje são as resinas termoendurecíveis como, por exemplo, as resinas de epóxido, fenólicas e poliéster insaturados. Estas resinas são obtidas por uma transformação química irreversível de um polímero em uma matriz polimérica amorfa. Como principais motivos na grande utilização, destaca-se o fato destas matrizes apresentarem características como baixa rigidez e resistência que, em certos casos, podem ser vantajosas em aplicações onde o reforço é feito com fibras e, também, devido ao fato do processamento não necessitar de altas temperaturas ou pressões, tornando os problemas associados à degradação dos reforços menos acentuados [26]. Na Tabela 2 abaixo temos propriedades de alguns exemplos de resinas termoendurecíveis. De forma geral, o fabrico do compósito baseia-se na impregnação da resina nas fibras (reforço) ou empilhando pré-impregnados que serão sujeitos a um processo de cura. Neste processo, devido a temperatura e pressão, as moléculas de resina criam ligações covalentes entre si, criando cadeias moleculares muito longas (polímeros), fazendo com que o material solidifique [8].

Tabela 2 – Propriedades das resinas termoendurecíveis, adaptado de [8].

	Epóxido	Poliéster	Fenólica	Poliimida
Massa Específica [g/cm ³]	1,1 - 1,4	1,1 - 1,5	1,3	1,2 - 1,9
Resistência à tração [MPa]	35 - 90	45 - 85	50 - 60	80 - 190
Módulo de Young [GPa]	2,1 - 6	1,3 - 4,5	4,4	3 - 3,1
Deformação na rotura [%]	1	1,5	2,5	1,2 - 1,9
Coefficiente de dilatação [10 ⁻⁶ /°C]	55 - 110	100 - 200	45 - 110	1490

2.5.2. Reforço

Os constituintes do reforço de um material compósito proporcionam a força e rigidez necessária, além de aumentar a resistência ao calor, corrosão e condutividade. Dependendo dos requisitos de projeto do novo material, o reforço pode ser utilizado para atender todas ou apenas uma das características anteriormente mencionadas [25]. O reforço precisa apresentar propriedades superiores à da matriz para representar uma vantagem para o compósito. Desta forma, mostra-se que o reforço tem uma grande importância na composição do material e sua escolha deve ser criteriosa [7].

Como já referido anteriormente, os compósitos podem ser combinados de diferentes formas, mas, normalmente, os mais usuais são os materiais constituídos por um reforço de fibra embutido em uma matriz polimérica (termorrígidas ou termoplásticas) [25]. As fibras que podem ser classificadas, em primeiro momento, como contínuas ou curtas (descontínuas), tendo como critério a relação entre o comprimento e o diâmetro ($l/d = 100$) [5]. Se levarmos em conta os compósitos obtidos a partir de matriz polimérica, os reforços mais utilizados atualmente na área dos compósitos são as fibras de vidro, de carbono, de aramida e de boro [7], [8], [25], [26]. As diversas fibras apresentadas na Figura 11 podem ser adquiridas sob a forma de rolos (*rovings*), mantas (*mats*), tecidos (*wovens*), inseridas em pré-impregnados ou compostos de moldação e pré-formas, [8] onde cada configuração resulta em diferentes propriedades. Devido as matrizes poliméricas serem menos resistentes e rígidas que as fibras, as propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos são influenciadas pelo comprimento, forma, composição, orientação das fibras em relação às solicitações mecânicas e, também, pelas frações volumétricas de cada constituinte. Tal dependência também ocorre nas propriedades higrotérmicas dos compósitos poliméricos como condução de calor, dilatação térmica e absorção de umidade. Assim, pode-se perceber que as propriedades dos compósitos são significativamente influenciadas por um grande número de fatores e variáveis que, apesar de tornar difícil a modelação matemática do comportamento mecânico, possibilita a liberdade em ajustar as propriedades adequadamente em razão das necessidades do engenheiro projetista de forma a atender aos requisitos específicos do projeto [7]. Por apresentarem diâmetros que variam entre os 0.0025 mm e os 0.13 mm, as fibras exibem elevada flexibilidade e são facilmente adaptáveis a qualquer geometria [26].

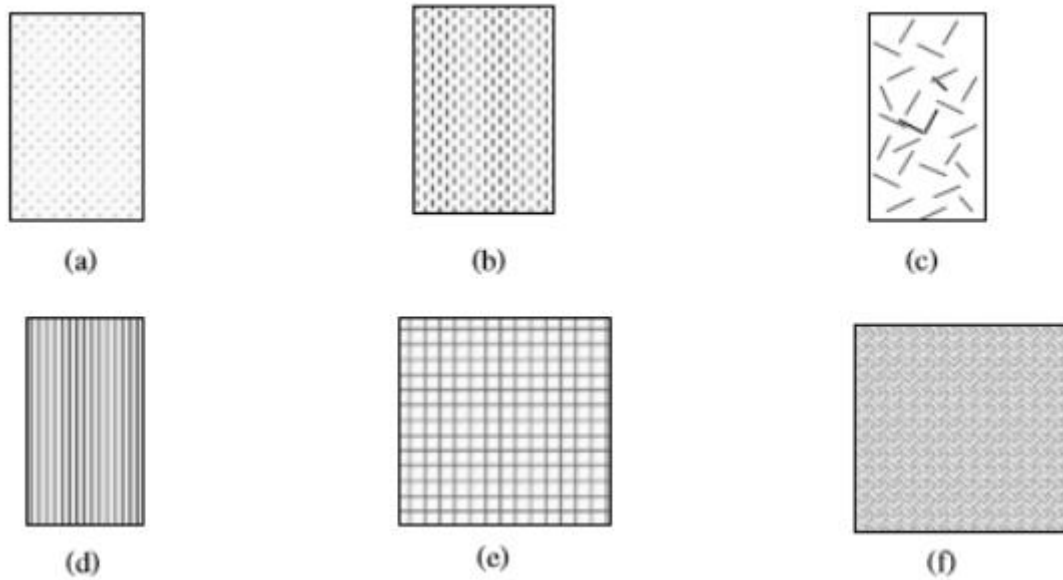


Figura 11 - Imagens de compósitos reforçados com: (a) partículas aleatórias; (b) fibras curtas unidirecionais; (c) fibras curtas aleatórias; (d) fibras contínuas unidirecionais; (e) fibras contínuas tecido e (f) fibras contínuas multidirecionais [26].

As fibras também podem ser classificadas de acordo com a sua origem, sendo sintéticas quando fabricadas pelo homem e naturais quando retiradas da natureza. As fibras sintéticas são encontradas nas mais diversas formas e composições para aplicações diversas e, geralmente, apresentam propriedades mecânicas e resistência à degradação superiores às encontradas nas de origem natural [6]. Na Figura 12 abaixo, apresenta-se uma classificação referente às fibras sintéticas utilizadas como reforço de materiais compósitos. Nos tópicos a seguir serão apresentadas as fibras de carbono, as fibras de vidro e as fibras aramídicas.

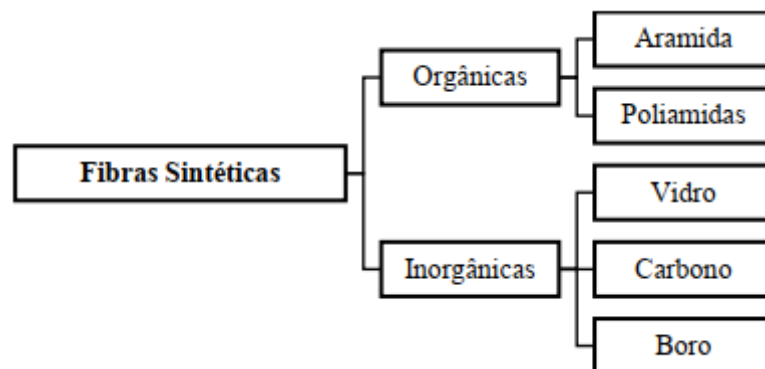


Figura 12 - Esquema dos reforços usados em compósitos reforçados com fibras. [26]

2.5.2.1. Fibras de Carbono

Fibra de carbono apresentam propriedades de excelência, tanto mecânicas como térmicas e químicas, aplicadas em projetos onde as características do material são cruciais para o uso do produto. Com aplicabilidade em satélites, submarinos, aeronaves, comboios de alta velocidade, equipamentos de recreação e muito presente na área automóvel, as fibras de carbono são utilizadas, geralmente, para aumentar a rigidez e resistência de compósitos avançados leves em aplicações críticas envolvendo peso. Além destas propriedades, as fibras de carbono possuem excelente resistência à fadiga, boas características de amortecimento de vibrações, estabilidade dimensional, possuem boa condutividade térmica e elétrica, coeficiente de expansão negativo e são quimicamente inertes, exceto quanto à oxidação. Caracterizados por uma gama de produtos filamentosos compostos por mais de 90% de carbono, com filamentos de 5 a 10 μm de diâmetro. A produção de fibras de carbono consiste na decomposição térmica de precursores orgânicos, sendo os principais: celulose (rayon), poliacritonitrilo (PAN) e o alcatrão (pitch) [7]. O processo rayon é pouco utilizado devido à necessidade de elevadas temperaturas na grafitação, tornando o processo mais caro [26]. O processo PAN, correspondente na produção de mais de 90% das fibras de carbono comerciais disponíveis atualmente, tem sido otimizado a fim de melhorar a eficiência e aumentar a resistência das fibras, módulo, deformação de falha e manipulação [7].

Como desvantagens têm-se que as fibras de carbono são frágeis, possuem baixa resistência ao impacto, baixa extensão de rotura, baixa resistência à compressão e elevado custo. Porém, a grande procura por este material têm incentivado estudos por métodos de fabrico que tornam o custo mais baixo. Como exemplo, existem estudos sobre métodos de reciclagem com o objetivo de obter fibras com menor custo e menor impacto ambiental [26].

As fibras de carbono são, normalmente, agrupadas de acordo com o módulo de elasticidade e podem ser encontrados com a seguinte nomenclatura:

- Fibras de Módulo Ultraelevado (UHM)
- Fibras de Módulo Elevado (HM)
- Fibras de Módulo Intermediário (IM)
- Fibras de Baixo Módulo (LM)

- Fibras de Alta Resistência (HS)

A Tabela 3 a seguir mostra algumas propriedades destas fibras.

Tabela 3 – Propriedades de tipos de fibras de carbono. Adaptado de [8].

		Tensão de Rotura [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Extensão após Rotura [%]
PAN	LM	3450-4500	228-234	1,6-1,8
	IM	5400-6400	275-300	2,1
	UHM	3500-4400	441-586	0,5-1
Pitch	SM	1900	379	0,5
	IM	2100	517	0,4
	UHM	3600	724-883	0,4
Rayon		758-821	35-42	-

2.5.2.2. Fibras de Vidro

São as fibras mais utilizadas no fabrico de materiais compósitos devido, principalmente, por apresentar menores custos [26]. Além do custo, outras vantagens na utilização deste são o baixo peso, inexistência de corrosão e a facilidade em obter formas complexas. A fabricação destas fibras ocorre por estiramento de vidro fundido através de uma fieira em liga de platina-ródio com orifícios de dimensões extremamente precisas [8]. Exemplos onde são utilizados este material são a construção de painéis de automóveis, barcos, acessórios desportivos, tubagens, cadeiras de estádios, mobiliário de habitações, estruturas de piscinas, entre outros [8], [26].

Mais especificamente para o fabrico de compósitos, existem as fibras dos tipos E, S e R. Algumas propriedades destas fibras são apresentadas na Tabela 4. As fibras do tipo E são as mais utilizadas devido às boas propriedades elétricas, mecânicas e químicas, além do seu custo reduzido. As fibras de vidro do tipo S e R são fabricadas a partir de vidros de alta resistência e bastante utilizados na indústria aeronáutica. Quando comparadas com as fibras do tipo E, apresentam 35% a mais de rigidez e melhor retenção de propriedades mecânicas em temperaturas elevadas [8].

Tabela 4 – Propriedades de vários tipos de fibra de vidro. Adaptado de [8].

	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Massa Específica [g/cm ³]	2,6	2,49	2,55
Módulo de Young [GPa]	73	85,5	86
Tensão de Rotura [MPa]	3400	4580	4400
Extensão de rotura [%]	4,4	5,3	5,2
Coefficiente de expansão térmica [10 ⁻⁶ /°C]	5,0	2,9	4,0

2.5.2.3. Fibras Aramídicas

São as fibras orgânicas mais utilizadas como reforço. Desenvolvidas pela DuPont® e mais conhecidas por Kevlar®, estas são fabricadas a partir de poliamida. Em termos de propriedades, estas apresentam tensão de rotura semelhante às fibras de carbono enquanto o módulo de elasticidade se encontra entre as fibras de carbono e as fibras de vidro. O fator mais importante desta fibra está na sua elevada tenacidade, isto é, na sua elevada extensão de rotura aliada às elevadas tensões de rotura. Compósitos reforçados com fibra aramídica são usualmente utilizados na área balística. Além desta área, pode-se encontrar este material em locais onde seja provável a ocorrência de impactos como, por exemplo, arestas de ataque de asas dos aviões ou reservatórios de alta pressão que estão sujeitos às elevadas tensões superficiais. Algumas classificações deste tipo de reforço e suas respectivas propriedades são apresentadas na Tabela [8].

Tabela 5 – Propriedades de tipos de fibras aramídicas. Adaptado de [8].

	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 149
Tensão de Rotura [MPa]	3600	4000	3400
Módulo de Young [GPa]	83	131	186
Extensão após Rotura [%]	4	2,8	2

2.6. Compósitos Híbridos

Compósitos híbridos são caracterizados por aqueles formados a partir da combinação de diferentes reforços embebidos na mesma matriz ou na utilização de uma

matriz constituída por diversos materiais. Estas novas combinações aumentam a já elevada flexibilidade dos compósitos na obtenção de diferentes propriedades para as mais diversas aplicações. A Figura 13 a seguir mostra os diferentes tipos de compósitos híbridos que são classificados como: intercamadas, quando a composição é feita por diferentes materiais; intracamadas se em cada camada tiver dois ou mais tipos de fibras entrelaçados entre si; e híbridos ao nível das fibras (hibridização de fibras) quando existe a combinação de diversos tipos de fibras para fabricação dos rolos ou tecidos [31].

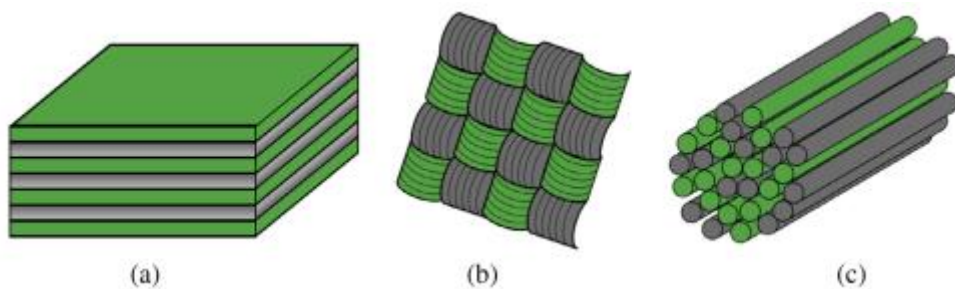


Figura 13 - Compósitos híbridos intercamada (a), intracamada (b) e hibridização de fibras(c). Adaptado de [31].

Além destes, mais recentemente tem-se aumentado estudos em compósitos híbridos de colocação preferencial, onde utilizam-se diferentes materiais que são colocados em áreas de uma estrutura onde se obtêm melhores resultados. O benefício na utilização deste tipo de compósito híbrido está na redução dos custos pois a utilização de materiais mais dispendiosos será apenas em locais específicos que beneficiam a utilização, ao invés de criar um componente inteiro deste material [8].

- Híbridos Compósito-Metal

Também conhecidos como FML – *Fiber Metal Laminates*, os híbridos compósito/metal são uma subcategoria dos compósitos híbridos constituídos por camadas de um compósito e de metal. Os primeiros estudos deste tipo de material foram realizados na *Delft University of Technology*, Holanda, que foram base para criação do primeiro FML em 1978, denominado de ARALL (*Aramid Fiber Reinforced Aluminum Laminate*). Este compósito era constituído por camadas de alumínio e de compósito feito de resina de epóxico e de fibras aramídicas, apresentando uma excelente resistência à fadiga. Com incentivo dos fabricantes, a produção em massa deste material, em 1984, deu origem à vários tipos de ARALL utilizando diferentes tipos de alumínio. A utilização de fibras de vidro e fibras de carbono no lugar das fibras aramídicas deu origem ao GLARE (*Glass Fiber Reinforced Aluminum Laminate*) e CARALL (*Carbon Fiber Reinforced Aluminum*

Laminate), respectivamente. Quando comparado com o ARALL, o GLARE é mais versátil por apresentar melhor resistência à compressão e melhor adesão ao metal que permite a utilização deste material em situações onde se verificam tensões biaxiais. Também comparando com o ARALL, o CARALL apresenta um desempenho superior à fadiga em cargas de frequência elevada e a elevada rigidez da fibra de carbono permite uma taxa de propagação das fendas inferior [8].

Os compósitos híbridos compósito/metais enaltecem as boas propriedades de cada material da mesma maneira que atenuam as desvantagens de cada um. Dentre as principais vantagens, pode-se destacar: boa resistência à fadiga, ao impacto, à humidade, à corrosão, ao fogo, boa capacidade de absorver energia e baixa densidade. As desvantagens destes materiais são o preço elevado e o tempo de fabrico. Porém, o custo pode ser compensado pela redução do número de partes necessárias para se obter um componente completo e, por possuir boa resistência à fadiga, tem-se menores números de manutenções/reparações [32].

A composição deste material também pode apresentar outros metais associados com materiais compósitos, em especial o Titânio que, por vezes combinado com o alumínio e CFPR em simultâneo, são utilizados na indústria aeronáutica. Na Figura 14 abaixo temos uma representação dos tipos de híbridos compósito/metal existentes [32].

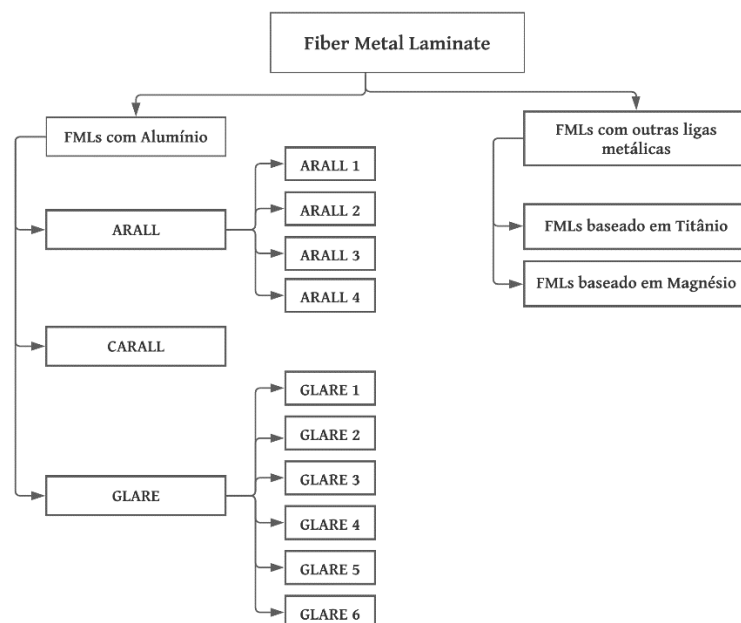


Figura 14 – Tipos de FMLs.

De maneira geral o processo de fabrico deste material é realizado com recurso da autoclave e segue os passos descritos abaixo [32]:

1. Preparação dos materiais, que consiste na preparação da superfície do metal por forma a aumentar o nível de adesão com o compósito;
2. Deposição dos materiais no molde;
3. Processo de cura;
4. Relaxação de tensões por forma a remover a tensões residuais resultantes do processo de cura. O seu aparecimento é devido às diferenças de elasticidade de cada material e são prejudiciais ao bom funcionamento do híbrido metal/compósito. O metal fica normalmente tracionado e as fibras comprimidas;
5. Inspeção final do produto.

A preparação da superfície do metal é o passo mais importante no fabrico, pois a interface entre o metal e o compósito constitui a zona mais crítica destes materiais. Logo, a superfície deve ser sujeita a um tratamento superficial para promover uma melhor adesão com o compósito. Este tratamento pode ser mecânico, químico, eletroquímico, com a utilização de primários/agentes de ligação e tratamentos a seco [32].

- Híbrido com Aço

Os compósitos híbridos com aço não tem sido alvo de muita investigação devido à elevada importância na redução de peso. Porém, nos últimos tempos tem surgido interesse neste exemplo de material, sobretudo, na indústria automóvel, em segmentos de veículos populares onde a busca por performance elevada não é o objetivo principal. Este interesse se deve ao fato de que grande parte dos chassis dos automóveis ainda possuem uma considerável percentagem de aço, logo, os avanços nos estudos acerca dos FML's se tornam atrativos para esta categoria para melhores propriedades mecânicas e menores custos [8].

2.7. Processos de Fabrico de Compósitos com Fibras

O fabrico de componentes em materiais compósitos formados por fibras e matrizes poliméricas dependem do tipo de matriz (termoplástica ou termoendurecível) e do tipo de reforço (fibras curtas ou fibras contínuas). O fabrico pode ser realizado por diferentes tipos de processos, porém a maioria destes passam por 4 fases: impregnação,

empilhamento, consolidação e solidificação [6]. Na Figura 14, tem-se as classificações dos principais processos de fabrico de compósitos composto por fibras para resinas termoplásticas e termoendurecíveis.

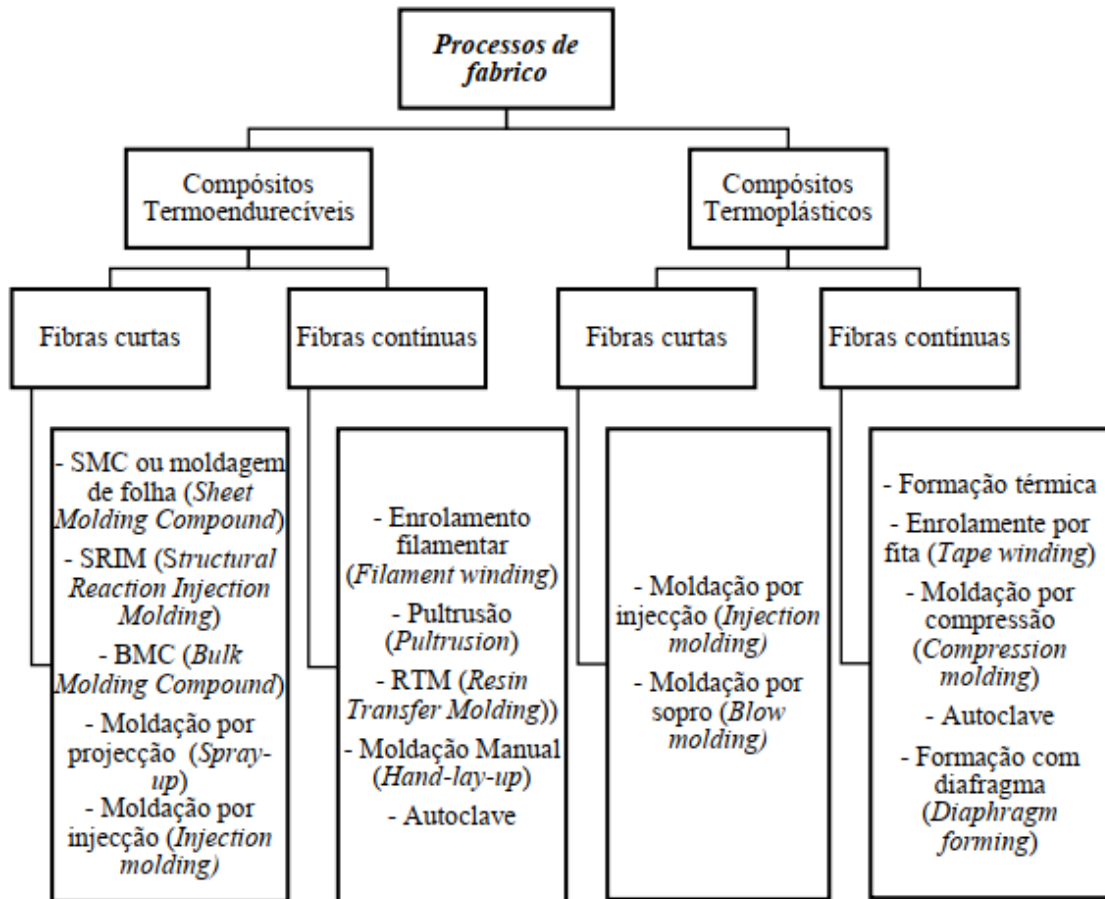


Figura 15 - Classificação dos processos de fabrico de acordo com o tipo de matriz [26].

Como já referido anteriormente, os processos de fabrico podem ser realizados por diferentes métodos, podendo ser exclusivamente manuais ou pela combinação de manuais e automáticos, para além disso, a moldagem pode ser realizada em molde aberto ou fechado [6]. Na Tabela 6, a seguir, se apresentam resumidamente algumas características dos processos mais utilizados no fabrico de compósitos, onde a maioria ainda necessita de mão-de-obra especializada capaz garantir a produção de produtos com qualidade, elevando o custo final [26].

Tabela 6 - Tabela resumo dos critérios de escolha de processos de fabrico [26].

Processo	Produtividade	Custo	Desempenho	Dimensão	Forma	Materiais
Enrolamento filamentar (<i>Filament winding</i>)	Lenta a rápida	Baixo a alto	Alto	Pequena a grande	Cilíndrica e aximétrica	Fibras contínuas com resinas epoxídicas e de poliésteres
Pultrusão (<i>Pultrusion</i>)	Rápida	Baixo a médio	Alto na direção longitudinal	Sem restrições no comprimento e pequena na secção transversal	Constante transversalmente	Fibras contínuas com resinas de poliéster e vinilester
Moldação Manual (<i>Hand-lay-up/ Wet lay-up</i>)	Baixa	Médio a alto	Médio a alto	Pequena a grande	Simples e complexa	Impregnados e fibras com resinas epoxídicas ou poliéster
Moldação por projeção (<i>Spray-up</i>)	Média a rápida	Baixo	Baixo	Pequena a média	Simples e complexa	Fibras curtas com resina catalisada
RTM (<i>Resin transfer moulding</i>)	Média	Baixo a médio	Médio	Pequena a média	Simples e complexa	Pré-formados com resinas epoxídicas e vinilester
SRIM (<i>Structural reaction injection moulding</i>)	Rápida	Baixo	Médio	Pequena a média	Simples e complexa	Pré-formados com resinas poliisocianatos
Moldação por compressão (<i>Compression moulding</i>)	Rápida	Médio	Médio	Pequena a média	Simples e complexa	SMC (sheet moulding compound)
Moldação por injeção (<i>Injection moulding</i>)	Rápida	Baixo a médio	Baixo a médio	Pequena	Complexa	Fibras curtas com resina termoplástica
SMC (<i>Sheet Molding Compound</i>)	Rápida	Baixo	Baixo	Pequena a grande	Complexa	Fibras curtas com resinas de poliéster e vinilester

2.8. Adesão e Interface Reforço/Matriz

A adesão pode ser definida como uma manifestação de forças atrativas entre os átomos e/ou superfícies. Especificamente na área dos compósitos estruturais, a adesão depende de fatores como o arranjo geométrico das fibras, difusividade dos elementos de cada constituinte, conformação molecular e constituição química da matriz, presença de grupos funcionais superficiais da fibra formados a partir de tratamento superficial e, também, da orientação, arranjo atômico, cristalinidade e propriedades químicas do reforço. Considerando a microestrutura dos materiais envolvidos, os principais modelos que tentam descrever o mecanismo de adesão podem ser classificados em: interdifusão,

atração eletrostática, ligação química, sinterização reativa e adesão mecânica. Com destaque para a ligação química e adesão mecânica, onde a primeira é a teoria de adesão mais antiga e a mais conhecida. Na ligação química, a resistência adesiva dependerá do número e do tipo de ligação, cuja formação ocorre por meio de reações químicas termicamente ativadas entre um grupamento químico na superfície da fibra e um grupo químico compatível na matriz. Na adesão mecânica, a ligação envolve ancoramento mecânico na interface. A resistência ao corte neste modelo depende de maneira significativa, sobretudo, do grau de rugosidade. Quando submetidos a esforços de tensão transversal, a resistência não é de grande magnitude, dependendo do número de reentrâncias, na forma de microporosidade, na superfície do reforço [7].

Diferentemente de uma caracterização quanto a natureza química e física relacionada ao comportamento da interface fibra de reforço/matriz, uma abordagem mecânica facilita o desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevem a distribuição de tensões na fibra, na matriz e na interface/interfase com o objetivo de determinar parâmetros interfaciais que caracterizam o compósito. Fatores como as propriedades do reforço e da matriz, a fração volumétrica de reforço, a orientação do reforço e o seu comprimento, além das propriedades da interface reforço/matriz influenciam as propriedades mecânicas e mecanismos de falha em compósitos. Mais especificamente, as propriedades da interface reforço/matriz são influenciadas pela resistência ao corte interfacial (τ_{if}), tenacidade à fratura interfacial (G_{if}), encolhimento da matriz e pelo coeficiente interfacial de fricção. Um alto valor de τ_{if} é de grande interesse para a interface reforço/matriz pois indica uma efetiva transferência de tensões da matriz para o reforço. A magnitude de τ_{if} também afeta o valor de G_{if} e sua determinação é realizada a partir de testes mecânicos [7].

2.9. Compósitos Híbridos Reforçados com LMF

O estudo e desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra de carbono e ligas de memória de forma se mostraram promissores como materiais inteligentes trabalhando sob carga termomecânica e como materiais estruturais com alto desempenho mecânico [33]. Embora não perturbem fortemente a microestrutura inicial e as propriedades estruturais e comprometam o benefício de baixo peso do compósito, a integração destes fios de LMF em compósitos podem adicionar funcionalidades ao material, como: mudança de forma, expansão térmica geral controlada, mudança na

frequência de vibração natural após “ativação”, dentre outras [34]. A demanda por esses tipos de materiais tem crescido devido às propriedades insatisfatórias dos materiais tradicionais que não respondem às mudanças do ambiente durante a condição de serviço [16]. No entanto, na prática foram encontradas limitações, pois as transformações de fase em geral ocorrem induzindo uma carga ou pela mudança de temperatura, limitando o tempo de resposta controlado pela cinética de transferência de calor. Além disso, deve-se analisar a compatibilidade dos fios da LMF com o compósito, exigindo adaptação à rota de processamento, bem como ao projeto da peça para manter propriedades estruturais suficientes e limitar o aumento do peso. Outro fator que pode ser considerado como desvantagem à combinação destes materiais está no aumento do peso que ocorre devido ao acréscimo da LMF [34].

Os estudos que incorporam estes compósitos híbridos são focados especificamente para cobrir as melhorias de propriedades de: amortecimento e vibração; impacto; fechamento de fissura; e mudança de forma [34]. A Figura 16 ilustra possibilidades de integração da LMF no compósito, bem como os métodos de processamento e as propriedades que podem ser aprimoradas.

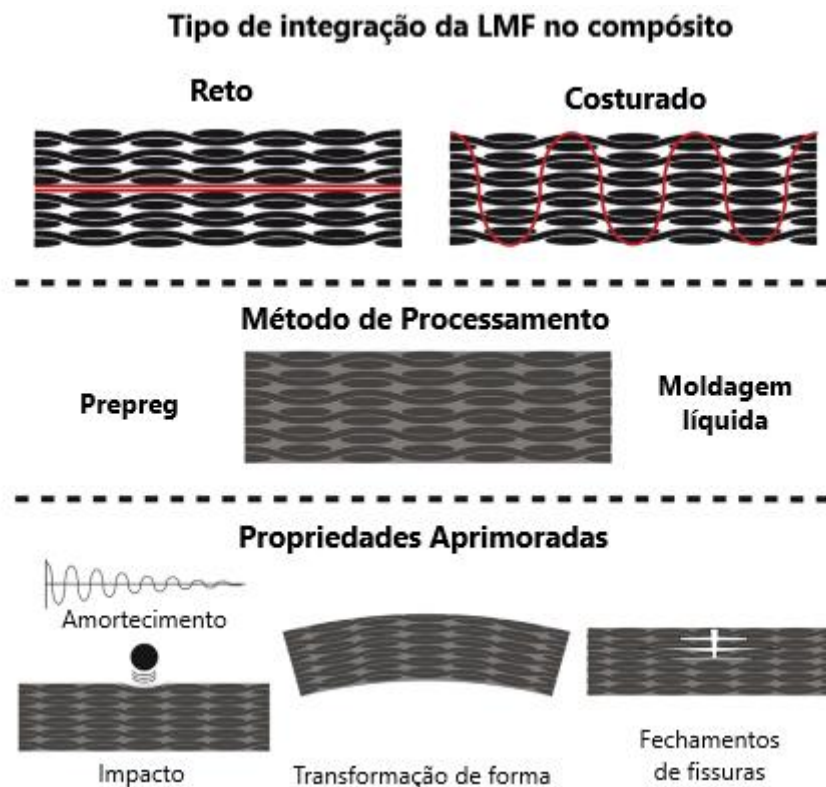


Figura 16 – Métodos e processos de integração de LMF em compósitos e propriedades que podem ser aprimoradas [34].

O uso de fios de LMF teve início na década de 90, onde diferentes frações volumétricas de fios de NiTi (5, 10 e 15%) foram incorporados em paralelo às camadas de reforço do compósito que era composto por um pré-impregnado de carbono-epóxi. Neste estudo foi demonstrado que, após aquecimento, o módulo de Young e a tensão de cedência aumentaram em um fator de 4 e 10, respectivamente. Também foi apresentado que a frequência natural desses sistemas poderia ser ajustada pelo aquecimento dos fios de LMF, o que permitiria ajustar as propriedades de vibração do compósito [35], [36].

As LMF na fase martensítica têm uma alta capacidade de amortecimento intrínseca. Desta forma, fios destes materiais podem ser introduzidos como um segundo reforço no compósito para aumento do amortecimento passivo sem que seja necessário um pré-tensionamento. Caso o material seja aquecido acima da temperatura de transformação austenítica, a mudança no módulo de Young e o amortecimento intrínseco diminuído podem contribuir para uma modificação das propriedades vibracionais, também conhecido como modificação modal ativa [34]. Em 2017, De Matos Junior [37] propôs um modelo semianalítico para prever a vibração de um compósito de carbono/epóxi contendo fios de LMF, proporcionando uma ferramenta para avaliar a eficácia da redução de vibração em função dos aspectos geométricos, além das propriedades de memória de forma em relação a temperatura.

Além da capacidade de melhorar as propriedades de amortecimento e vibração em compósitos, as LMF também podem suprimir ou pelo menos diminuir o dano subsequente de um impacto [34]. Dentro do campo de compósitos híbridos reforçados com LMF existe diversos estudos sobre impactos. Um dos primeiros estudos conseguiu demonstrar que a utilização de fios de NiTi (0.4 [mm] de diâmetro) em um compósito reforçado com fibra de carbono foi capaz de melhorar a resposta a danos por impacto de baixa velocidade. A fração de 2.8% dos fios foi capaz de permitir um aumento de 25% na resistência ao impacto em relação aos compósitos sem fios de LMF. Para mais, os fios impediram a perfuração da estrutura pelo impactador [38]. Para se beneficiar ainda mais das propriedades dos fios de LMF, um pré-tensionamento pode ser aplicado aos fios antes de integrá-los à estrutura [34].

Outro ponto importante está na questão do fabrico deste compósito, pois ainda não se tem um método padrão de fabrico onde se apresenta os melhores resultados, principalmente em relação a adesão superficial entre a liga e o compósito. Um exemplo

é apresentado na Figura 17, onde o fabrico ocorre através da prensagem a quente uniaxial com uma adaptação nas colunas da estrutura da prensa. Esta adaptação é necessária para o alinhamento e fixação dos fios, e foi realizada basicamente com madeira, afinadores de guitarra e anilhas planas de metal. O espaçamento entre fios é garantido pelas anilhas e o alinhamento é garantido pelo afinador que ao ser girado tensiona o fio [33].

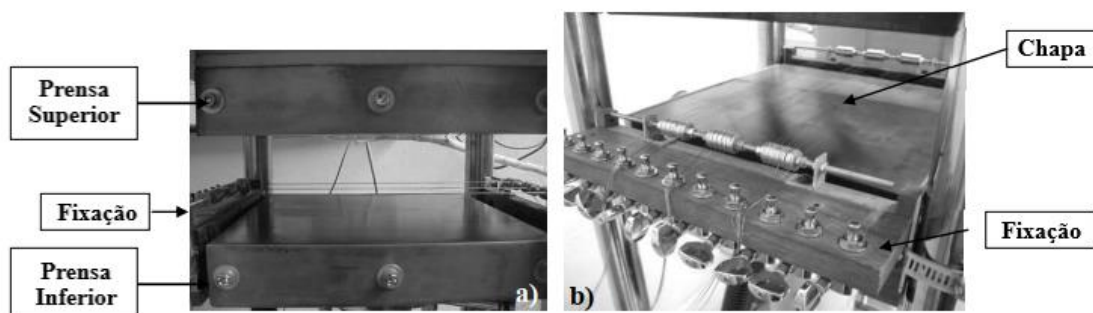


Figura 17 – Alinhamento e método de fixação fabricados e usados no experimento de [33].

Após o fabrico, os provetes foram submetidos à uma análise dinâmico-mecânica (DMA) onde obteve-se resultados para o módulo de armazenamento, que pode ser definido como a medida da energia mecânica que o material é capaz de armazenar. Nos resultados obteve-se três picos que representam as transformações de fase martensítica-austenítica de cada fio de NiTi no corpo de prova. Estes diferentes picos provavelmente ocorreram devido a distribuição de calor não ser uniforme durante a DMA. Ainda, segundo o autor, estes resultados preliminares mostram que o módulo de armazenamento do CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*) com fio de NiTi aumenta durante a transformação de fase do fio [33].

No trabalho de Araujo *et al* [39] é proposto uma outra alternativa para o fabrico dos provetes de CFRP-NiTi. Neste caso, é utilizado uma máquina de ensaio universal (Instron Model15582) equipada com uma câmara termicamente controlada que precisou ser mecanicamente adaptada para fabricar o compósito composto por fibras de carbono pré-impregnadas, resina epoxy e fios de NiTi (0.29 [mm] de diâmetro). O equipamento foi adaptado com um molde de pressão projetado como ilustra a Figura 18. Neste projeto, a força produzida nas peças da máquina de ensaio (1) é transmitida por um disco de pressão (2) à placa de aço inoxidável (3) e à base (6). Os fios de NiTi são igualmente espaçados e orientados por dois gabaritos de fixação (5) e instalados entre a placa (3) e a base (6). Duas camadas do pré-impregnado CFRP são colocadas abaixo e acima dos fios NiTi. Nesse sistema, as fibras de carbono estão alinhadas com as de NiTi

e, após a montagem entre a placa (3) e a base (6), o sistema CFRP – NiTi é instalado na câmara térmica da máquina de ensaio para moldagem por pressão a quente. A moldagem por pressão a quente uniaxial foi realizada a 110 [°C] por cerca de 4 horas sob aproximadamente 0,32 [MPa] seguido de um arrefecimento natural na câmara térmica.

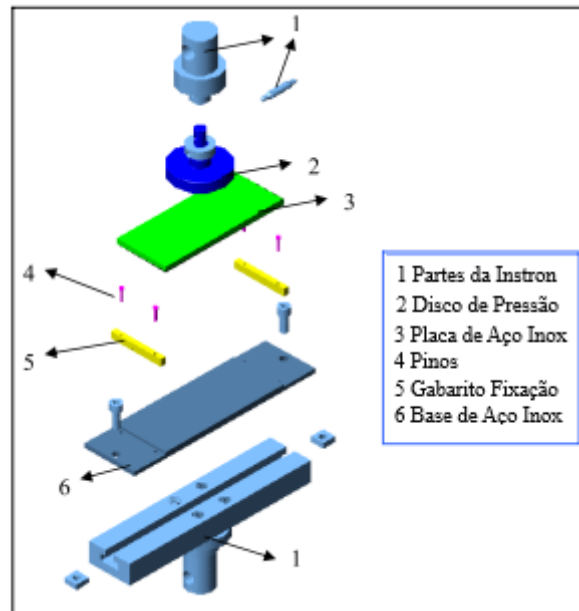


Figura 18 – Projeto do sistema de moldagem por pressão adaptado por [39] da máquina 5582 Instron.

Após o sucesso no fabrico dos provetes, foi realizada a caracterização mecânica dos corpos de prova por meio de ensaios de flexão em três pontos. Além disso, os efeitos da flambagem térmica foram verificados por ativação elétrica dos corpos de prova em um modo de feixe em balanço e a influência dos fios de NiTi SMA em três estados diferentes (trabalhado a frio, recozido e treinado) foi analisada. Foi demonstrado que o compósito contendo fios de NiTi trabalhados a frio apresentaram um comportamento clássico de flambagem térmica que aumenta a deflexão da ponta do corpo de prova durante o aquecimento até temperaturas de até 100 [°C]. Por outro lado, notou-se uma diminuição, na ordem de cinco vezes, a deflexão na ponta do corpo de prova quando se utilizou de fios transformados (recozido/treinado) pois a expansão térmica do CFRP foi minimizada por um efeito de memória bidirecional assistido por estresse. Observou-se uma redução maior e estável do fenômeno de flambagem térmica nos compósitos compostos por fios de NiTinol treinados [39].

De maneira geral, adicionar fios de LMF influenciam nas propriedades intrínsecas dos compósitos reforçados com fibras devido: a rigidez da LMF (na ordem de 10-80

[GPa] dependendo do estado cristalográfico e composição) em comparação com a rigidez do compósito; a resistência e deformação até a falha dos fios de LMF; e as propriedades de interface. Lau *et al.* [40] mostraram que o módulo de tração de suas estruturas compósitas modificadas era superior ao da estrutura de referência, pois o módulo de tração dos fios de LMF (30GPa) era maior que o do material base (15GPa). No entanto, seus resultados também mostraram que a presença benéfica dos fios foi limitada em frações de maior volume devido ao desalinhamento dos fios quando grandes quantidades são usadas. Os autores também demonstraram que a frequência natural das placas compósitas diminuiu com o aumento da quantidade de fios de LMF e, portanto, a taxa de amortecimento aumentou. Com uma melhor capacidade de amortecimento, esta estrutura compósita pode fornecer uma melhoria na absorção de energia de impacto.

Os estudos sobre compósitos híbridos que utilizam LMF apresentam vários problemas e parâmetros críticos para selecionar, produzir e testar. Na maioria dos artigos relatados utilizam-se de fibras pré-impregnadas, a matriz é geralmente um termofixo (principalmente epoxy, às vezes poliéster ou viniéster) e a LMF é o NiTiInol, eventualmente com adição de cobre, com temperatura de transformação de fase próxima à temperatura ambiente. Os problemas e parâmetros críticos podem ser divididos em diferentes categorias como: **Seleção dos fios** – deve ser criteriosa, levando em consideração principalmente o diâmetro e a temperatura de transformação de fase; **Seleção do material base (reforço base e matriz)**; **Posicionamento da LMF no compósito** – dependendo da aplicação requerida os fios podem estar dispostos de diferentes maneiras; **Avaliação do processo de cura** – para evitar recuperação de forma indesejada; **Adesão entre a LMF e matriz**; **Pré-tensionamento**; e **tipo de ativação** [34].

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da liga de Níquel-Titânio

Neste capítulo será apresentado a caracterização da liga de Níquel-Titânio, onde foram propostos e realizados: uma análise metalográfica; uma análise para se verificar as temperaturas de transformação de fase; e um método para obtenção da composição química da liga. Para todas as técnicas de caracterização serão descritos os procedimentos, normas e equipamentos utilizados.

3.1.1. Análise Metalográfica

Para análise metalográfica do presente trabalho foram analisadas duas ligas de NiTi adquiridas em diferentes laboratórios: a primeira do fornecedor 1, com diâmetro de 0,5 [mm], temperatura A_{fi} de $-10 \pm 5^{\circ}\text{C}$ e tendo, de acordo com o fornecedor, 56,08 % de Ni na sua composição química, conforme Tabela 7. O segundo material analisado foi proveniente do fornecedor 2, possuindo um diâmetro de 2 mm e temperatura A_{fi} de $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Tabela 7 - Composição da liga Níquel-Titânio com A_{fi} de -10°C .

Elemento	Presença na liga (%)
Níquel	56,08
Titânio	43,83
Carbono	0,042
Nitrogênio	0,005
Hidrogênio	0,001
Oxigênio	0,041

Para realizar a análise metalográfica é necessário realizar o encapsulamento da amostra em material transparente, como apresentado na Figura 19, pois há o risco do provete alterar a posição durante o encapsulamento devido à pequena dimensão da secção transversal do fio, caso fosse realizado em material opaco, qualquer alteração na posição desejada seria notada somente durante o processo de abrasão. Portanto utilizou-se a resina de acrílico transparente Clarofest 572. O processo de encapsulamento foi realizado mantendo-se uma temperatura de 180°C com pressão constante de 35 [kN] durante um

período de 4 minutos, seguido por um arrefecimento realizado na própria máquina com um caudal mínimo de água durante 6 minutos.

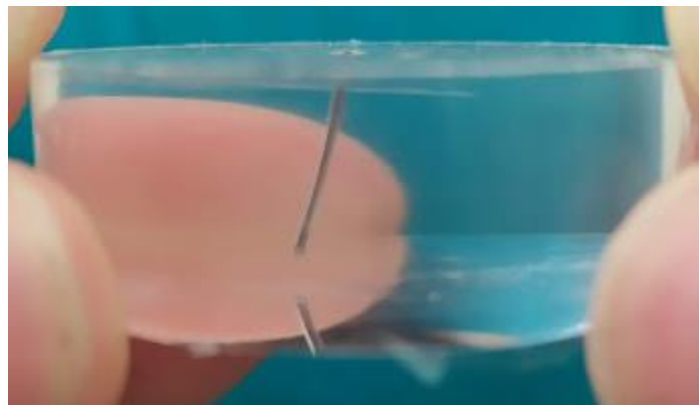


Figura 19 - Amostra encapsulada em material transparente.

As amostras embutidas foram classificadas de três formas diferentes: “A” e “B” são do fornecedor 1, onde a primeira não sofreu deformação plástica e a segunda sofreu deformação até seu rompimento; “C” é do fornecedor 2 e não sofreu deformação plástica.

As lixas utilizadas em ordem crescente de granulação foram: 180, 240, 320, 600, 1000 e 1200, tentando obter-se uma superfície espelhada. Após a utilização das lixas, as amostras foram submetidas ao polimento mecânico com sílica coloidal amórfica. O processo de abrasão por meio de lixa das amostras é um processo delicado, pois, durante a compressão da amostra, pode ocorrer a recristalização da mesma, sendo necessária grande atenção, uma vez que a morfologia de amostras de NiTiInol são influenciadas por tratamentos térmicos [17], porém a temperatura de recristalização de uma liga Níquel-Titânio é relativamente alta, em uma amostra que tenha, por exemplo, 25% de deformação a temperatura de recristalização está em torno de 500°C e 600°C [41].

O ataque químico utilizado para revelar o contorno de grão do material deu-se através da aplicação sobre a liga NiTi de uma solução contendo ácido nítrico com ácido fluorídrico (proporção de 5:1) por um período de 2 a 3 minutos em temperatura ambiente. Como a solução do ataque químico reagiu com o acrílico utilizado para realizar o encapsulamento, foi necessário a realização de um novo polimento para retirar o material que se depositou sobre a superfície a ser observada.

Para visualizar o contorno de grão das amostras foi utilizado um microscópio ótico com capacidade de ampliação de 10x e 50x, com uma câmera digital acoplada. Para determinar a escala da fotografia se utilizou o *software* de processamento de imagem *Fuji/Image* que através de uma medida conhecida na imagem, no caso o diâmetro do fio, é capaz de relacionar o número de pixels com a distância.

3.1.2. Varrimento Diferencial por Calorimetria (DSC)

Resultados obtidos seguindo a norma ASTM F2004-17 [42] demonstram que a transição apresentada pelo NiTiInol tem característica reversível e histerética. A dimensão da histerese pode ser relatada como a diferença entre o pico da transformação da austenite e o pico da transformação martensítica [43]. A ASTM [42] define normas para que testes de DSC (differential scanning calorimeter ou Calorimetria exploratória diferencial) que buscam obter a temperatura de transformação de fases de ligas de Níquel Titânio seja realizado. O resultado registra um pico endotérmico na mudança de fase durante o aquecimento e um pico exotérmico também durante a mudança de fase no arrefecimento, sendo aplicado a ligas de Níquel Titânio livres de tensões residuais, que tenham um peso nominal de Níquel entre 54,5% a 57%.

Para que o teste seja realizado com sucesso é importante se certificar que o corte da amostra não cause deformações localizadas ou aquecimentos, evitar que exista grande oxidação durante o tratamento térmico que pode acabar acarretando em mudanças no teste, além da taxa de aquecimento e arrefecimento adequadas durante a realização do teste, sendo estabelecido um valor de 10°C/min pela norma F2004-17 [42]. Slough [43], porém, demonstrou que ao variar a taxa de aquecimento e arrefecimento não se nota grande diferenças nas temperatura de transição e que quanto maior a taxa, maiores são os picos de transformação de fase, embora taxas inferiores não comprometam os resultados.

Para o teste devem ser utilizadas amostras entre 25 e 45 [mg], recozidas a uma temperatura entre 800 e 850°C durante um período de 15 a 60 minutos, sendo arrefecido rapidamente. É importante que não se deixe uma grande camada de oxido nas amostras [42]. Para o teste também é necessário que a amostra seja aquecida a pelo menos 30°C acima da A_f e resfriada a pelo menos -30°C abaixo da M_f [42].

Mais especificamente, para o ensaio realizado uma porção de 87,01 mg da amostra do fornecedor 1 foi tratada a 850 °C por 15 minutos a uma pressão atmosférica de -0,7 bar e foi arrefecida em água. A amostra do fornecedor 2 tinha um valor de massa de 40,85 mg e foi tratada à mesma temperatura por um tempo de 20 minutos a uma pressão de -0,2 bar, sendo arrefecida ao ar. Verificou-se que mesmo sob vácuo, ambas as amostras apresentavam a superfície oxidada. Como grandes camadas de óxido podem resultar em alterações no DSC, foi necessário a realização do polimento destas.

Logo, realizou-se o polimento químico com a mesma solução utilizada para o processo de ataque químico durante a preparação metalográfica, ou seja, ácido nítrico e

ácido fluorídrico na proporção de 5:1. As amostras foram colocadas em tubos de centrifugação com a adição de pouco mais de 1,5 [ml] da solução por um período de 1:30h, sendo agitadas eventualmente ao longo do polimento. Notou-se uma considerável remoção do óxido e a solução apresentou um tom esverdeado em ambos os casos. A massa da amostra do fornecedor 1 reduziu 9,65 % e a do fornecedor 2 apresentou uma redução de 10,01 %.

O ensaio de DSC foi realizado no equipamento DSC204 F1 do fabricante Phoenix® abrangendo uma faixa de temperatura entre -70 °C e 100 °C, sendo esta uma região onde é seguro a realização do teste com o cadinho de alumínio e que coincide com a faixa na qual as mudanças de fase geralmente estão presentes em ligas comerciais [18].

As amostras de NiTinol utilizadas no DSC dos fornecedores 1 e 2 continham respectivamente 38,33 [mg] e 36,76 [mg]. O histórico da mudança de temperatura para uma variação de temperatura fixa de 20 [°C/min] deu-se da seguinte forma: o material iniciou-se a temperatura ambiente de 25 °C e foi aquecido a 100 °C, seguido de um arrefecimento até -100 °C, passando novamente por um aquecimento até 100 °C, sendo então arrefecida a 20 °C para que pudesse ser retirada do equipamento.

3.1.3. Espectrometria de Absorção Atômica por Chama

Realizar a análise química de matérias é fundamental, afim de assegurar que a matéria prima tenha certas especificações que vão garantir a qualidade do produto final, sendo especialmente importante em ligas metálicas [44]. Portanto, quando se trabalha com materiais como ligas de Níquel-Titânio, onde 1% de alteração química gera 100 °C de diferença na temperatura de transformação [4], tal análise torna-se ainda mais importante.

Um dos processos mais comuns e bem-sucedidos de absorção atômica é a Espectrometria de Absorção Atômica por Chama, conhecida também pela sigla FAAS - *Flame Atomic Absorption Spectrometry*.

No presente trabalho buscou-se realizar a análise parcial, focada no constituinte principal Níquel, com uma amostra de tamanho semi micro ($10^{-2} \geq x > 10^{-1}$ [g]) e utilizando o método FAAS. Para tanto, o primeiro teste a ser realizado neste tipo de experimento é a capacidade de digestão do metal nos ácidos. Logo, o primeiro teste realizado foi emergir pequenas quantidades de NiTinol, com cerca de 0,05 [g] cada. As amostras foram mergulhadas por um período de 24h cada uma em uma das 3 soluções a seguir:

- Ácido Nítrico (Riedel-de-Häen, 65%);
- Ácido Clorídrico (Fluka, 37%);
- Ácido Nítrico + Ácido Clorídrico na proporção de 3:2.

A partir dos resultados obtidos acima, foi possível dar procedimento ao teste.

As amostras de NiTinol de aproximadamente 50[mg] cada foram aquecidas a 400 °C em 30ml de ácido clorídrico, buscando digerir as amostras. Para tanto foi utilizado um sistema fechado (é possível que algo tenha escapado e se utilizou um filtro para não haver contaminação), onde o vapor de ácido clorídrico com o NiTinol evaporava e subia a um tubo arrefecido, onde ele condensava e voltava para o local de aquecimento, como demonstrado na Figura 20. O procedimento durou uma hora para cada amostra. Reguladores de ebulição (esferas de vidro) foram utilizados. Após o fim do processo, a solução foi filtrada e completada com água destilada até que se alcançassem os 50[ml].

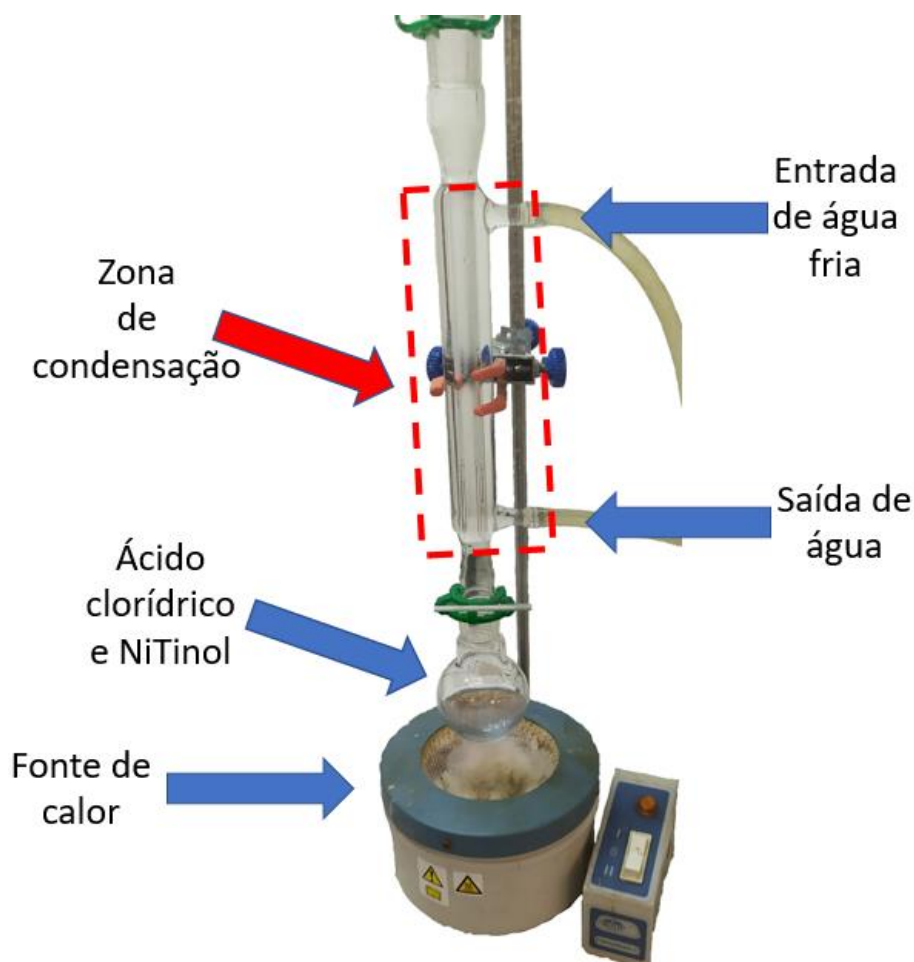


Figura 20 - Esquema montado para realizar a digestão de NiTinol em ácido clorídrico.

O procedimento foi realizado em 4 amostras, com as massas apresentadas na Tabela 8, onde se buscou sempre uma quantidade próxima de 50 [mg] do fio de NiTinol cortado em pequenas partes.

Tabela 8 - Amostras de NiTinol para digestão com as respectivas massas

Amostra	Massa [mg]
1	49,8
2	49,1
3	49,2
4	49,6

Vale ressaltar que a amostra 4 usou a mesma tara da primeira e da segunda amostras.

Como a amostra deve ter aproximadamente 56,08% de Níquel, tem-se que a amostra 1, por exemplo, tem 27,92 [mg] deste elemento de Níquel, como observado na Equação 1:

$$\frac{49,8 * 56,08}{100} = 27,92 \text{ mg} \quad (1)$$

Logo, a concentração em $\mu\text{g/ml}$ será, conforme a Equação 2, de:

$$\frac{27,92 \times 10^3 \mu\text{g}}{50 \text{ ml}} = 558,4 \mu\text{g/ml} \quad (2)$$

Portanto será utilizada uma faixa de onda de 362,5 [nm] que consegue obter resultados em uma faixa de 100-8000 ppm (ou $\mu\text{g/ml}$).

Com base nos dados acima, foram escolhidas as seguintes concentrações para se estabelecer os padrões para a calibração da máquina: 100, 200, 500, 800 e 1000 ppm de Níquel.

Tendo um volume final de 50ml e uma concentração inicial de 1000 ppm, buscou-se o volume das demais concentrações para os padrões de calibração da máquina a partir da Equação 3:

$$C_i * Vol_i = C_f * Vol_f \quad (3)$$

Onde C_i é a concentração inicial; Vol_i é o volume inicial; C_f é a concentração final e Vol_f é o volume final.

Logo se obteve os valores apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Concentração final de Níquel e volume inicial correspondente

Concentração final (ppm)	Volume inicial (ml)
100	5
200	10
500	25
800	40
1000	50

Os recipientes foram limpos em ácido nítrico para retirar quaisquer resquícios de metais. Foi adicionado água com 5% de HNO₃ até chegar a 50 ml no volume final.

As soluções foram encaminhadas para o laboratório do Centro de Investigação da Montanha para serem analisadas com auxílio do equipamento ASS (Espectrômetro de Absorção Atômica) do fabricante Perkin Elmer modelo Pinaacle 900T.

3.1.4. Ensaio de Tração

Ensaio de tração é o tipo de ensaio mais utilizado na engenharia e consiste basicamente na aplicação de uma carga de tração uniaxial crescente em um provete até que o mesmo se rompa [45], [46]. A partir dos dados de força aplicada e da deformação medida no corpo, geralmente através de um extensômetro, se obtém a curva tensão x deformação [45].

Através deste ensaio pode-se obter o limite de resistência a tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, coeficiente de encruamento, coeficiente de resistência e parâmetros referentes a ductilidade do material [45].

Neste tipo de ensaio, a tensão convencional é dada pela Equação 4:

$$\sigma_{con} = \frac{P}{St_o} \quad (4)$$

Onde σ_{con} [Pa] é a tensão convencional, P [N] é a carga aplicada e St_o [m²] é a seção transversal original.

Já a deformação convencional é dada na Equação 5.

$$\epsilon_{con} = \frac{l - l_o}{l_o} = \frac{\Delta l}{l_o} \quad (5)$$

Onde ϵ_{con} é a deformação convencional, l_o [m] é o comprimento inicial de referência e l [m] é o comprimento de referência para cada carga P aplicada.

Já o módulo de elasticidade por sua vez, é dado se aplicando a lei de Hooke na região elástica do material, como visto na equação 6.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{P \cdot l_0}{St_0 \cdot \Delta l} \quad (6)$$

Nos ensaios conduzidos por Hilário (2019) com um fio de NiTinol com 0,5 [mm] de diâmetro e comprimento de 50 [mm], há uma taxa de deformação de 0,5 [mm/min], realizado até o rompimento do provete, se obteve os resultados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Propriedades da liga de NiTi extraídas a partir do ensaio de rotura [19]

Propriedades	Valor
Tensão de rotura	1088,6 [MPa]
Deformação máxima de rotura	31,17 [%]
Módulo de elasticidade Austenítica	39,03 [GPa]
Módulo de elasticidade Martensítica	10,04 [GPa]

3.2. Fabricação do Compósito Híbrido

Com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas do compósito híbrido formado por uma matriz de poliéster reforçado com fibra de carbono e fios de NiTinol, foram fabricados corpos de provas (provetes) que atendessem aos requisitos básicos das normas ASTM D3039 [47] e ASTM D7264 [48]. No intuito de se obter um fabrico simples e que apresentasse bons resultados, optou-se pela escolha do método de prensagem a frio (*cold molding*). Todos os equipamentos, ferramentas e consumíveis necessários para fabricação se encontram no Laboratório de Materiais de Construção Mecânica (LMCM) no prédio da ESTiG do IPB. Os corpos de prova eram formados por duas camadas de fibras de carbono e diferentes quantidades de fios de NiTi entre os tecidos, conforme Figura 21. Foi necessário apenas uma adaptação na chapa base para que os fios ficassem esticados com uma pré-carga mínima.

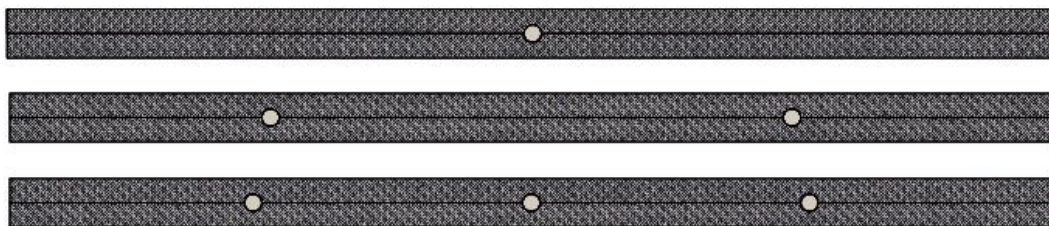


Figura 21 – Compósito híbrido com duas camadas de fibra de carbono e fios de NiTi.

3.2.1. Materiais

Fios de NiTiinol

Para o fabrico do compósito foram utilizados fios de Níquel – Titânio com 0,25[mm] de diâmetro e temperatura de transformação A_f de -10°C ($\pm 5\text{K}$), adquiridos na Heiko Engelhardt Formgedächtnistechnik (Figura 22).



Figura 22 – Fios de NiTi da H.E. Formgedächtnistechnik.

A composição química desta liga, segundo informação do fornecedor, está indicada na Tabela 11. Nota-se pequenas variações na composição química dos fios com 0,5 [mm] de diâmetro, caracterizados, e os fios com 0,25 [mm] de diâmetro utilizados no compósito híbrido.

Tabela 11 - Composição química da liga de NiTi, Af = -10°C.

Elemento	%
Ti	Remaider
Ni	55,9
C	0,016
O	0,04
N	0,002
H	0,0005
Co	<0,01
Cu	<0,01
Cr	<0,01
Nb	<0,02
Fe	<0,02

Fibra de Carbono

Assim como já mencionado anteriormente, para o presente trabalho se utilizará como reforço a fibra de carbono. Estas foram adquiridas pelo IPB sob a forma de mantas com 1 metros de largura (Figura 23). Como a aquisição destas mantas de fibra de carbono são feitas em revendedores com empresas pequenas e em baixa quantidade, não se tem fichas técnicas acerca das mesmas, sendo necessário realizar ensaios mecânicos para, também, caracterizar a fibra.



Figura 23 – Manta de fibra de carbono disponibilizada pelo IPB.

Resina Poliéster e Catalizador

A resina utilizada foi a de poliéster pré-acelerada da empresa MR Dinis dos Santos Ltda. O catalizador, adquirido na mesma empresa, é o padrão para resina poliéster e é

composto por peróxido de metiletilcetona. A proporção recomendada de catalisador é de 1,5% no verão e 2% no inverno, segundo o próprio fornecedor.



Figura 24 – Resina Poliéster e catalisador utilizados.

Além dos citados anteriormente, pode-se destacar os seguintes materiais que foram utilizados para o fabrico:

- Cera desmoldante;
- Espátula;
- Lixa HermesTM WS Flex 18C [P180];
- Trincha.

3.2.2. Equipamentos

Estrutura e macaco hidráulico

O fabrico do compósito pelo método de prensagem a frio é realizado utilizando-se de uma estrutura formada por perfis I e um macaco hidráulico (gato hidráulico) do tipo garrafa com pistão hidráulico e fuso de aproximação, com capacidade de 6 toneladas. O conjunto da estrutura com o macaco hidráulico é apresentado na Figura 25, a seguir.

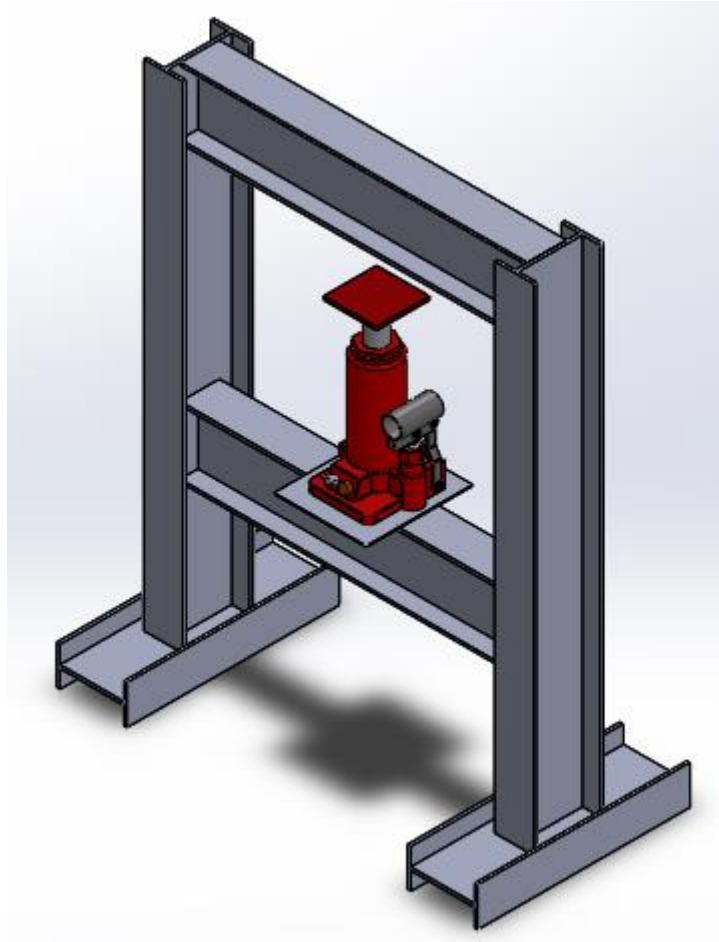


Figura 25 - Estrutura em perfis I e macaco hidráulico.

Chapas bases

Para o fabrico do tecido de fibra de carbono com os fios faz-se necessário a utilização de duas chapas base nomeadamente de chapa base inferior e chapa base superior (Figura 26).



Figura 26 – Conjunto de chapas base inferior e superior, respetivamente.

Foi exigido uma adaptação na chapa base inferior para que fosse possível manter os fios esticados durante o processo de cura da resina de poliéster. Para isso foram realizadas ranhuras nos bordos da chapa, denominados também de guias, além da adição de três parafusos nas laterais que serão utilizados para o tensionamento do fio. A adaptação foi estudada e executada levando como base as determinações da norma ASTM D3039 para compósitos visando testes realizados na direção longitudinal, onde, segundo a Tabela 16 retirada da norma, o corpo de prova deve ter 250 x 15 [mm]. Desta maneira, a adaptação foi executada considerando os seguintes fatores: a distância entre fios deve ser uniforme e compatível com a largura mínima requisitada; por apresentar defeitos após a cura, evitou-se as bordas do provete; devido à dimensão da placa ser de 298 x 245 [mm] e às dimensões exigidas pela norma, os fios devem ficar paralelos ao comprimento da placa; deve-se aproveitar ao máximo a linha de produção do compósito, isto é, obter o maior número de corpos de prova em cada processo de fabrico.

Como o presente trabalho pretende avaliar o comportamento do compósito híbrido com diferentes frações volumétricas da liga de NiTi, definiu-se que os corpos de prova teriam de 1 a 3 fios inseridos na matriz. De acordo com os fatores mencionados no parágrafo anterior, seguiu o espaçamento entre fios conforme é ilustrado na Figura 27. No caso do provete com 3 fios, tem-se o fio central com uma distância de 3,75 [mm] dos fios laterais, sendo a distância dos fios laterais até o bordo do provete também de 3,75 [mm]. Para o caso do provete com 2 fios, utiliza-se as guias laterais, sendo a central suprimida. Por fim, a produção com um único fio utiliza-se apenas da guia central.

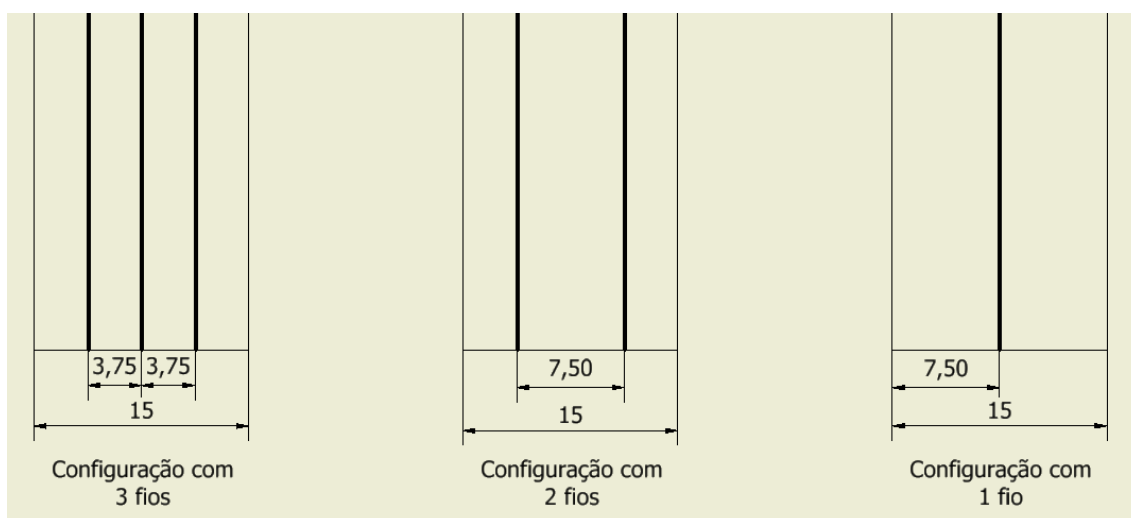


Figura 27 – Espaçamento entre fios dependendo da configuração de fabrico [49].

Seguindo o critério de se obter o maior número de corpos de prova por processo, definiu-se uma distância de 30 [mm] entre as guias centrais. Espaçados assim, tem-se uma distância segura para o posterior procedimento de corte e, caso não haja nenhum defeito de corte, é possível obter corpos de prova sem fios para realização dos testes. Desta maneira, em cada processo será possível fabricar 6 provetes, para além dos possíveis provetes sem fios.

Para que se possa garantir que os fios ficarão na direção esperada, sem que ocorram desvios que eventualmente possam levar a concentração de tensão em um determinado ponto, diminuindo assim suas propriedades mecânicas, tem-se de tracionar o fio, e para tanto, utiliza-se uma carga mínima de tração [50]. Para que esta carga mínima seja aplicada, foram realizados 3 furos na parte lateral da chapa base. Com a utilização de parafusos, porcas e arruelas, as extremidades dos fios podem ser fixas nos furos e tensionadas com o giro do parafuso.

Inicialmente, o fio é preso através da pressão exercida pela porca pressionando a arruela. Após esse aperto inicial, o fio é passado pelas guias de acordo com o número de provetes e a quantidade de fios desejada. Nesta etapa o fio é pré-tensionado manualmente para que fique alinhado. No final, o fio é fixo de forma semelhante, sendo que um leve giro do parafuso permite um maior tensionamento.

Guilhotina

Para que se obtenha o dimensionamento recomendado pela norma ASTM foi necessário a utilização da guilhotina industrial *Guifil mini 320* que se encontra no Laboratório de Tecnologia Mecânica (ESTiG-IPB). Também foram realizados testes de corte do compósito híbrido com auxílio do X-ato, de uma tesoura, da rebarbadeira e da guilhotina de papel, porém o uso destes foi descartado por não apresentarem bons resultados quanto à capacidade e retilinearidade de corte.

3.2.3. Processos

Para realizar a fabricação da placa são necessários 9 passos, que são apresentados de forma detalhada a seguir:

1º passo: O primeiro procedimento realizado é o lixamento do fio de NiTiInol. Para tanto o fio é passado pela lixa por 4 vezes. Tal etapa é adotada não apenas para retirar a camada de óxido superficial, mas também para melhorar a adesão do fio.

No **2º passo**, a fibra é cortada de acordo com o tamanho das chapas base. Como a dimensão da chapa base inferior é de 298 x 245 [mm], essa deve ser a dimensão máxima da fibra. Foi colocado uma fita adesiva nos cantos da fibra, buscando evitar que o tecido se desfaça.

O **3º passo** consiste em passar cera desmoldante na superfície das chapas base inferior e superior que estarão em contato com a resina. A cera é fundamental para que a placa consiga ser retirada após o processo de cura.

No **4º passo** a fibra é pesada e a quantidade de resina e catalizador necessários para sua fabricação são calculados. Neste processo utilizou-se a proporção de aproximadamente 2.3 de resina para cada 1 [g] de fibra de carbono. Para a quantidade de catalizador, utilizou-se a proporção de inverno recomendada pelo fabricante de 2% do peso total da resina.

A seguir, no **5º passo**, a resina é misturada ao catalisador nas proporções indicadas.

No **6º passo** monta-se a fibra com os fios. Para isto, deve-se posicionar primeiramente a camada inferior da fibra e, após isso, colocar o fio passando pelas guias feitas na chapa base inferior.

O passo a seguir, **7º passo**, consiste na aplicação da resina na fibra sobre a camada inferior de fibra e o fio. A resina deve ser espalhada com o auxílio de uma trincha ou outro instrumento apropriado e deve-se garantir que se tenha resina suficiente e que ela penetre totalmente a fibra. Após estar bem molhado pela resina, deve-se colocar a segunda camada de fibra (camada superior) e aplicar a resina até que ela também esteja suficientemente molhada.

O **8º passo** consiste em colocar a chapa base superior e aplicar pressão sobre o material. Para tanto se faz uma aplicação indireta de pressão. Para que a pressão aplicada seja mais bem distribuída, são colocadas duas grandes placas envolvendo as chapas base, conforme Figura 28.



Figura 28 - Estrutura de prensagem do compósito híbrido com as placas montadas.

Realizados os procedimentos descritos anteriormente, o compósito deve permanecer por um período de aproximadamente 24 horas. Vale ressaltar que se utilizou um aquecedor e desumidificador durante o processo de cura. O aquecedor teve objetivo de manter a temperatura sempre acima dos 20 °C e o desumidificador é utilizado para tentar manter a umidade relativa do ar abaixo dos 80%, embora não se possa garantir que tal objetivo tenha sido alcançado devido à ausência de instrumentação adequada para se realizar tal aferição.

Por fim, o **9º passo** consiste na realização do corte da placa na guilhotina nas dimensões previstas anteriormente. Neste passo deve-se ter atenção ao realizar o corte para que os bordos do provete estejam paralelos aos fios de NiTiInol.

As dimensões dos provetes foram medidas com paquímetro e são apresentadas nas Tabelas 12-15, abaixo. Os provetes foram nomeados de acordo com o número de fios presente em sua composição, onde SF indica que não há fios e 1C1F indica que este é o primeiro provete e possui apenas um fio em sua composição.

Tabela 12 - Dimensões dos provetes sem fios de NiTiInol.

	Espessura [mm]	Largura [mm]
1SF	0,69	15,56
2SF	0,71	15,06
3SF	0,75	15,57
4SF	0,62	15,04
5SF	0,65	15,54

Tabela 13 - Dimensões do provete com 1 fio de NiTiInol.

	Espessura [mm]	Largura [mm]
1C1F	0,73	15,27
2C1F	0,74	15,89
3C1F	0,69	15,40
4C1F	0,75	15,05
5C1F	0,71	15,52

Tabela 14 – Dimensões dos provetes com 2 fios de NiTiInol.

	Espessura [mm]	Largura [mm]
1C2F	0,85	15,40
2C2F	0,75	15,13
3C2F	0,73	15,34
4C2F	0,83	15,45
5C2F	0,75	15,48

Tabela 15 - Dimensões dos provetes com 3 fios de NiTiInol.

	Espessura [mm]	Largura [mm]
1C3F	0,85	15,29
2C3F	0,69	15,47
3C3F	0,62	15,04
4C3F	0,65	16,29
5C3F	0,86	15,41

Tem-se pequenas variações na espessura da chapa devido à dificuldade em colocar exatamente a mesma pressão exercida pelo macaco hidráulico em todos os processos de

fabrico. Essa variação também ocorre pois não é garantido que a pressão aplicada seja bem distribuída em toda a placa.

3.3.Caracterização do Compósito Híbrido

3.3.1. Regras da Mistura

As propriedades de materiais compósitos são determinadas por três fatores: os materiais usados no fabrico do compósito; a forma geométrica dos elementos constituintes e a estrutura resultante; e a forma como as fases interagem entre si. Como as propriedades de um material compósito podem ser definidos como uma função dos materiais constituintes, pode-se utilizar a regra das misturas para estimar de forma aproximada certas características. De acordo com esta regra, cada fase constituinte do compósito contribui de forma proporcional à sua fração volumétrica para as propriedades finais do compósito [5].

Existem dois modelos formulados para obtenção do módulo de elasticidade de um compósito. O modelo de Voigt considera a iso-deformação da unidade básica dos compósitos, ou seja, tanto a deformação da fase contínua (matriz) quanto a deformação da fase dispersa (reforço) são iguais à deformação do compósito ($\epsilon_{co} = \epsilon_r = \epsilon_m$). Assim, a tensão do compósito (σ_{co}) é descrita em termos das tensões e frações volumétricas da fase contínua (V_m) e das fases dispersas (V_r) [23], segundo a Equação 7:

$$\sigma_{co} = \sigma_r \times V_r + \sigma_m \times V_m \quad (7)$$

Logo, o módulo de elasticidade do compósito pode ser expresso em função do módulo de Young de cada um dos componentes e suas frações volumétricas:

$$E_{co} = E_r \times V_r + E_m \times V_m \quad (8)$$

Por outro lado, o modelo de Reuss assume a iso-tensão, onde os componentes sofrem a mesma tensão ($\sigma_{co} = \sigma_r = \sigma_m$) [23]. Desta forma, o módulo pode ser modelado segundo a Equação 9.

$$\frac{1}{E_{co}} = \frac{V_r}{E_r} + \frac{V_m}{E_m} \quad (9)$$

Observa-se que a regra das misturas é simplificada e não leva em conta a existência de vazios nem os efeitos da interface, considerando uma interface perfeita entre matriz e carga. Os modelos descritos anteriormente representam os limites superior e inferior para os possíveis valores do módulo de elasticidade [23].

3.3.2. Ensaio de Tração

O ensaio de tração para caracterização do compósito híbrido segue a norma D3039/D3039M da ASTM (2017) que sugere um método padrão do ensaio para obtenção das propriedades de tração em materiais compósitos de matrizes poliméricas reforçados com fibras, contínuas ou descontínuas de alto módulo de elasticidade.

Segundo a norma, o ensaio pode ser caracterizado como uma fina tira plana de material com secção transversal retangular plana (Figura 29), seguindo as geometrias recomendadas pela norma conforme a Tabela 16, montada na garra de uma máquina de teste mecânico onde é tensionada até que ocorra a ruptura. A resistência final do material pode ser determinada a partir da força máxima carregada antes da falha. Além da resistência pode-se obter a tensão de ruptura, o módulo de elasticidade de tração, coeficiente de Poisson e a deformação de transição.



Figura 29 - Provetes cortados para o ensaio de tração.

Tabela 16 - Recomendação de geometrias das amostras de tração ASTM, adaptado.

Orientação da fibra	Largura, mm	Comprimento total, mm	Espessura, mm	Comprimento da guia, mm	Espessura da guia, mm	Ângulo de chanfro da guia, °
0° unidirecional	15	250	1	56	1,5	7 ou 90
90° unidirecional	25	175	2	25	1,5	90
Balanceado e simétrico	25	250	2,5	Lixa de esmeril	-	-
Aleatório-descontínuo	25	250	2,5	Lixa de esmeril	-	-

Para o ensaio de tração foi utilizada a máquina “Autograph AGS-X – 10kN” com auxílio do software “TrapeziumZ – Materials Testing Software”, ambos da empresa Shimadzu (Figura 30).



Figura 30 – Máquina utilizada para o ensaio de tração.

Para o ensaio, arbitrou-se um comprimento entre garras de 200 [mm] em todos os provetes com diferentes frações volumétricas de fios. Para além, seguindo as recomendações da norma, os parâmetros dos ensaios adotados foram configurados no *software* para uma taxa de deformação de 2 [mm/min] até a ruptura do provete e todas as dimensões dos provetes apresentados anteriormente também foram adicionados no *software* para obtenção dos resultados.

A ASTM (2017) define também que se deve calcular o valor médio, desvio padrão e o coeficiente de variação para cada uma das propriedades obtidas. Desse modo, a média da amostra (\bar{x}) é demonstrada pela Equação 10:

$$\bar{x} = \frac{(\sum_{j=1}^n x_j)}{n} \quad (10)$$

Onde n é o número de amostras; x_j é a propriedade medida.

O desvio padrão da amostra (S_{n-1}), por sua vez, é dado pela Equação 11:

$$S_{n-1} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n x_j^2 - n\bar{x}^2)}{n - 1}} \quad (11)$$

Por fim, o coeficiente de variação amostral (CV) é apresentado na Equação 12.

$$CV = 100 \times \frac{S_{n-1}}{\bar{x}} \quad (12)$$

3.3.3. Modelo Matemático para Regra da Mistura em Compósitos Híbridos

De forma semelhante ao exposto no capítulo 3.3.1., considerando apenas o modelo de Voigt, os compósitos híbridos podem ter seu módulo de elasticidade longitudinal calculado de acordo com a Equação 13 [51]:

$$E_{ch} = E_{r1}V_{r1} + E_{r2}V_{r2} + E_mV_m \quad (13)$$

Onde apenas foi acrescentado um termo à equação que diz respeito ao acréscimo de mais um reforço ao material compósito. Para o coeficiente de Poisson e para a tensão têm-se que, pelas Equações 14 e 15:

$$v_{ch} = v_{r1}V_{r1} + v_{r2}V_{r2} + v_mV_m \quad (14)$$

$$\sigma_{ch} = \sigma_{r1}V_{r1} + \sigma_{r2}V_{r2} + \sigma_mV_m \quad (15)$$

Em um estudo realizado por Liu (1998) [52] sobre materiais compósitos reforçados com fibras, foi elaborado um método passo a passo da regra da mistura onde

é possível se obter o módulo de elasticidade, o módulo de corte e o coeficiente de Poisson. O método segue um processo iterativo até que os valores converjam para o resultado. Na primeira iteração é calculado a propriedade do compósito considerando um cilindro do material da matriz com um cilindro do reforço ao centro. A próxima iteração receberá os valores encontrados anteriormente e os utilizará como um novo valor para as propriedades da matriz, que terá novamente um cilindro ao centro representando o reforço. O processo iterativo é ilustrado na Figura 31.

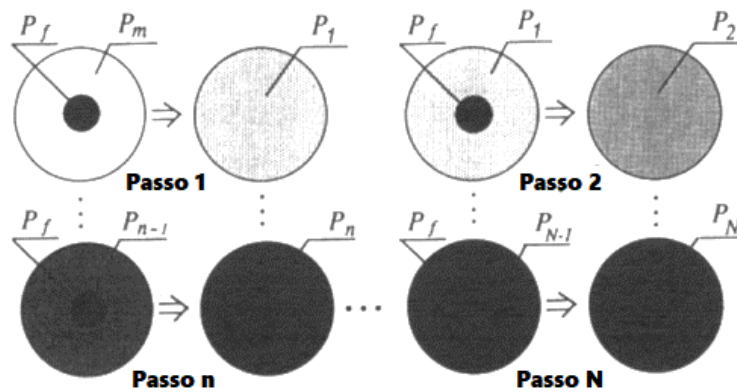


Figura 31 - Método passo a passo proposto por Liu [52].

Assim, a fração de fibra na primeira interação do compósito será dada pela razão entre a área da fibra e a área da matriz, como apresenta a Equação 16.

$$V_{fi1} = \frac{\pi * a^2}{\pi * b^2} = \frac{a^2}{b^2} \quad (16)$$

Onde a é o raio da fibra e b é o raio da matriz.

Quando se passa a interação 2, o volume de fibra passa a ser como indicado na Equação 17.

$$V_{fi2} = V_{fi1} + (1 - V_{fi1})V_{fi1} = V_{fi1} + V_{m1} * V_{fi1} \quad (17)$$

Onde V_{m1} é basicamente a fração restante do material, conforme demonstrado na Equação 18.

$$V_{m1} = 1 - V_{fi1} \quad (18)$$

Dessa forma, após “n” passos ou interações, a fração de fibra no último passo será de conforme a Equação 19.

$$V_{fin} = 1 - (1 - V_{fi1})^n \quad (19)$$

O número de interações deve ser um valor tal que a partir de um primeiro valor hipotético de fração de fibra V_{fi1} , após “n” interações o valor deve ser correspondente a fração de fibra real (V_{fi}) que se deseja obter as propriedades. Dessa forma, o número de interações que se deve realizar é apresentado na Equação 20.

$$N = \frac{\ln(1 - V_{fi})}{\ln(1 - V_{fi1})} \quad (20)$$

Pode-se, ainda, se colocar o valor de V_{fi1} em função do número de interações desejada, isolando o valor na equação anterior. Deste modo, o valor da fração de fibra na primeira interação, em função do número de interações desejadas, é dado pela Equação 21.

$$V_{fi1} = -e^{\frac{\ln(1-V_{fi})}{N}} + 1 \quad (21)$$

Baseado nos dados obtidos acima, é possível se calcular o módulo de corte G_{xy} , que é obtido através da Equação 22.

$$G_{xyn} = G_{xy(n-1)} + \frac{V_{fi1}}{\frac{1}{(G_{xyfi} - G_{xy(n-1)})} + \frac{V_{m1}}{2G_{xy(n-1)}}} \quad (22)$$

Onde G_{xyfi} é o modulo de corte no plano perpendicular a x na direção y da fibra e a quando se trata da interação primeira interação, o valor do módulo de corte na interação de valor “0” é tratado como sendo o módulo de corte da matriz do material.

Para o cálculo do módulo de elasticidade na direção perpendicular da orientação da fibra (E_y), obtido através da Equação 23.

$$E_y = \frac{4KG_{yz}}{K + m'G_{yz}} \quad (23)$$

Onde K é o módulo volumétrico, G_{yz} é o modulo de corte no plano perpendicular a y na direção z da fibra. O parâmetro m' é apresentado na Equação 24.

$$m' = 1 + \frac{4Kv_{xy}^2}{E_x} \quad (24)$$

Já o modulo volumétrico, que descreve a tendência do material em se deformar, é apresentado na Equação 25.

$$K_n = K_{n-1} + \frac{V_{fi1}}{\frac{1}{K_f - K_{n-1}} + \frac{V_{m1}}{K_{n-1} + G_{yz(n-1)}}} \quad (25)$$

Onde K_f é o módulo volumétrico da fibra e G_{yz} é o módulo de corte perpendicular ao eixo y na direção z, que é obtido através da Equação 26.

$$G_{yzn} = \frac{1}{2} (G_{yzn}^{(+)} + G_{yzn}^{(-)}) \quad (26)$$

De forma que se $G_{yzf} > G_{yz(n-1)}$ e $K_f > K_{n-1}$, tem-se que:

$$G_{yzn}^{(-)} = G_{yz(n-1)} + \frac{V_{f1}}{\frac{1}{G_{yzf} - G_{yz(n-1)}} + \frac{V_{m1}(K_{n-1} + 2G_{yz(n-1)})}{2G_{yz(n-1)}(K_{n-1} + G_{yz(n-1)})}} \quad (27)$$

$$G_{yzn}^{(+)} = G_{yz(n-1)} \left\{ 1 + \frac{(1 + \beta_1)V_{f1}}{\rho - V_{f1}[1 + 3\beta_1^2 V_{m1}^2 / (\alpha V_{f1}^3 + 1)]} \right\} \quad (28)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{\beta_1 - \gamma\beta_2}{1 + \gamma\beta_2}, \rho = \frac{\gamma + \beta_1}{\gamma - 1} \quad (29)$$

$$\beta_1 = \frac{K_{n-1}}{K_{n-1} + 2G_{yz(n-1)}}, \beta_2 = \frac{K_f}{K_f + 2G_{yzf}}, \gamma = \frac{G_{yzf}}{G_{yz(n-1)}} \quad (30)$$

Já para o caso de $G_{yzf} < G_{yz(n-1)}$ e $K_f < K_{n-1}$ tem-se que:

$$G_{yzn}^{(+)} = G_{yz(n-1)} + \frac{V_{f1}}{\frac{1}{G_{yzf} - G_{yz(n-1)}} + \frac{V_{m1}(K_{n-1} + 2G_{yz(n-1)})}{2G_{yz(n-1)}(K_{n-1} + G_{yz(n-1)})}} \quad (31)$$

$$G_{yzn}^{(-)} = G_{yz(n-1)} \left\{ 1 + \frac{(1 + \beta_1)V_{f1}}{\rho - V_{f1}[1 + 3\beta_1^2 V_{m1}^2 / (\alpha V_{f1}^3 - \beta_1)]} \right\} \quad (32)$$

Em seu estudo sobre compósito híbrido de matriz polimérica reforçado com fibra de vidro, Nobrega [49] elaborou um código no programa MatLab[®] para que fosse capaz de verificar os resultados obtidos por Liu [52]. Para este trabalho será utilizado o algoritmo feito no MatLab[®] e os parâmetros de entrada que serão utilizados se referem às propriedades mecânicas e às geometrias dos provetes do compósito reforçado com fibra de carbono com e sem os fios de NiTinol [49]. Outras informações que não puderam ser obtidas nos testes experimentais realizados foram obtidas na literatura.

3.3.4. Análise por Método dos Elementos Finitos (Ansys[®])

Sabe-se que em certas situações é extremamente difícil a resolução dos mais diversos problemas encontrados na engenharia devido às complexidades físicas e matemáticas, sejam eles das mais diversas áreas que envolvam, por exemplo, transferência de calor, mecânica dos fluídos, estruturas, malhas elétricas, comportamento mecânico dos materiais, dentre outros. Uma alternativa que vem sendo amplamente utilizada por pesquisadores e estudiosos é o uso de métodos numéricos, onde a função desconhecida que descreve uma determinada grandeza é aproximada e resolvida de acordo com algum parâmetro [53].

Uma importante ferramenta desenvolvida é o método dos elementos finitos (MEF), que tem sido utilizado na resolução dos mais diferentes problemas de engenharia. O MEF pode ser considerado um instrumento poderoso quer pela sua capacidade em tratar uma grande gama de fenômenos físicos, quer pela sua facilidade de aplicação. O desenvolvimento que este método tem tido a par do crescimento, em termos de capacidade e velocidade de cálculo, que se tem verificado com a constante evolução dos computadores, chips e processadores, permite a obtenção de soluções cada vez mais aproximadas [54].

Esta ferramenta consiste em um método número aproximado para análise dos fenômenos físicos que ocorrem em meios contínuos e que são descritos através de funções parciais, com determinadas condições de contorno e possivelmente com condições iniciais. A ideia do MEF consiste em dividir o domínio do problema em sub-regiões de geometria simples, denominada elementos finitos por apresentarem dimensões finitas. Os elementos finitos são conectados entre si através de determinados pontos, denominados nós ou pontos nodais. Ao conjunto de elementos finitos e nós, dá-se o nome de malha de elementos finitos. Embora seja um método aproximado, quanto maior for o número de elementos em uma malha, à medida que o tamanho dos elementos finitos tende a zero e o número de nós tende a infinito, mais precisos serão os resultados da análise [55].

Atualmente existem alguns softwares desenvolvidos para solucionar problemas que envolvam MEF, sendo o principal deles o Ansys®. Este software é um código de elementos e de diferenças finitas comercial utilizado para modelar sólidos de forma a resolver problemas na modelação de forma/funções, tensões, deformações, fluxo de fluidos, entre outros. Para a realização da simulação foi escolhido o *software* Ansys® Workbench 19.2.

Antes da realização da simulação no Ansys®, foi necessário desenhar a geometria do provete no *software* SOLIDWORKS 2019. Para o desenho foram definidas as dimensões de 200x15x0.7 [mm] que são próximas às encontradas nos provetes reais e que o modelo fosse uma montagem formada por dois materiais: os fios de NiTiNol (\varnothing 0,25 [mm]) e o compósito de matriz de poliéster reforçado com fibra de carbono. Após isto, já no *software* Ansys®, foram inseridas no *Engineering Data* as propriedades dos materiais encontradas experimentalmente. Foi optado a realização de uma análise *Static Structural (steady-state)* com solução a partir dos elementos finitos SOLID186, CONTA174 e SURF154, definidos pelo próprio programa. A Figura 32 ilustra as condições da simulação onde apenas foi definido um suporte fixo em um dos lados e uma força na outra face. O deslocamento só foi permitido ao longo do eixo da força, sendo impedido em todas as outras direções.

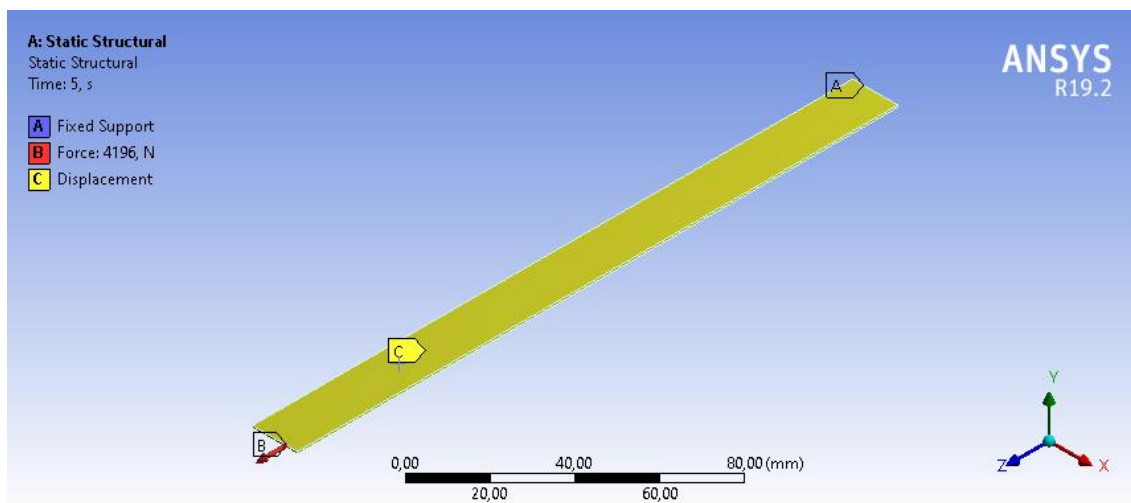


Figura 32 – Condições para simulação no Ansys.

As forças são apresentadas na Tabela 17 e foram definidas de acordo com a média das forças máximas, em Newtons, alcançadas nos ensaios experimentais para cada tipo de provete.

Tabela 17 - Forças utilizadas para a simulação.

Configuração	Força Máxima [N]
C1F	4196
C2F	4138
C3F	3632

A malha foi criada através do comando “*Sizing*” com tamanho de 1 [mm] para todos os corpos (Figura 33).

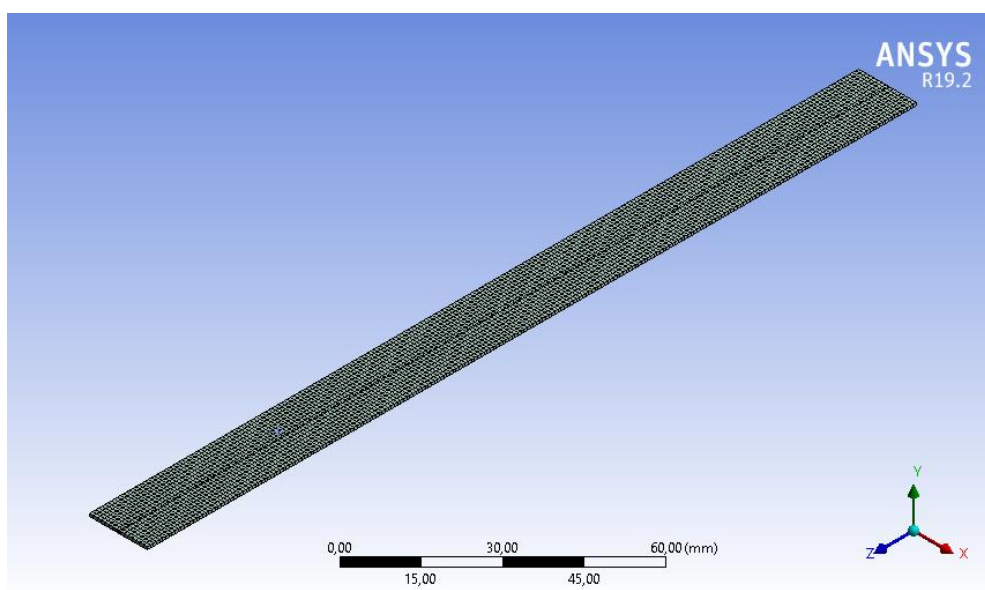


Figura 33 - Malha de 1 mm definida para resolução da simulação.

A forma de contato entre o fio de NiTiNol e compósito de fibra/resina selecionadas foram os “*Bonded*”, “*No separation*” e “*Rough*”. O método *Bonded* permite soluções lineares e não permite a separação ou deslizamento da geometria em contato. O método *No separation* é similar ao anterior, porém permitindo o deslizamento entre os corpos, mas não uma separação. Por fim, a configuração *Rough* considera o contacto perfeitamente áspero onde não há deslizamento, considerando um atrito infinito entre os corpos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Resultado para análise metalográfica da liga de Níquel-Titânio

Os resultados obtidos através da análise metalográfica só são capazes de determinar o contorno de grão, não sendo possível a determinação das fases presentes na microestrutura. A Figura 34 apresenta a comparação dos resultados das amostras “A” e “B”, sendo possível observar que, embora uma das amostras tenha sofrido deformação plástica e a outra não, os grãos não apresentaram diferenças notáveis nas suas geometrias.

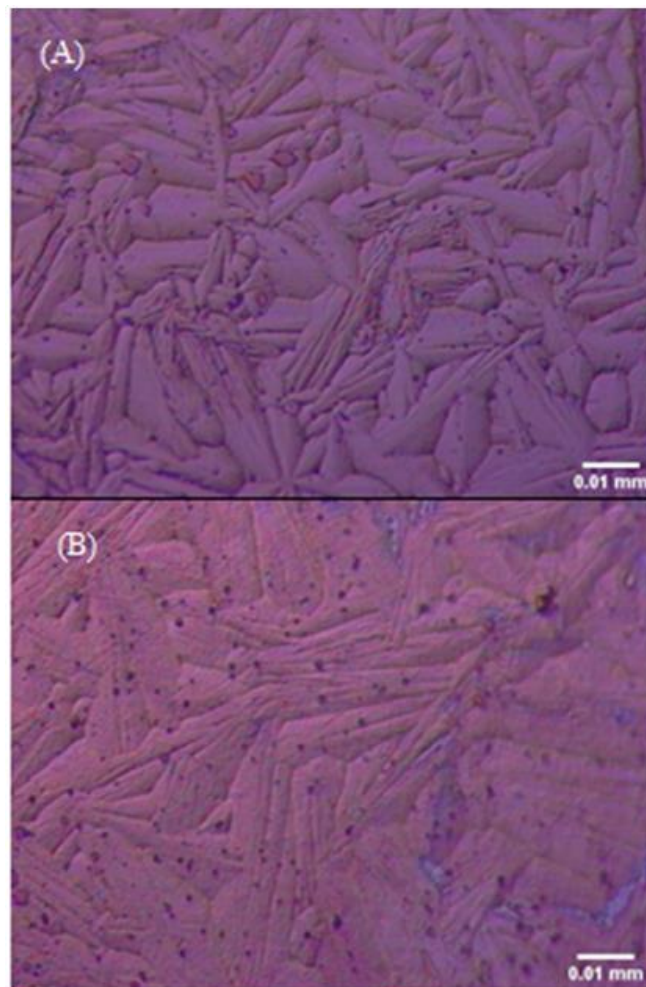


Figura 34 - Contornos de grão da amostra “A”; b) Contornos de grão da amostra “B”. ampliação de 50x.

A amostra do fornecedor 2, observada na Figura 35, não apresentou grande diferença em relação à geometria e tamanho de grão em relação as amostras do outro fornecedor, mediante a análise qualitativa realizada.

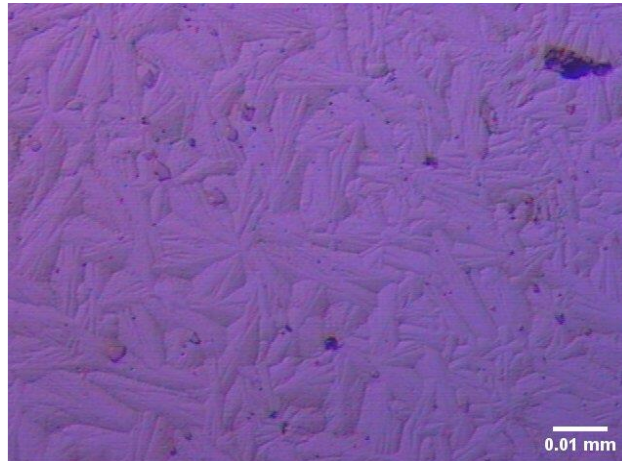


Figura 35 - Contornos de grão da amostra “C”. ampliação de 50x.

Observa-se que em todas as situações só foi possível se observar o contorno de grão e não as fases presentes, embora se soubesse que se tratava da fase austenítica em todos os casos.

4.2. Resultado para DSC da liga de Níquel-Titânio

Os resultados do DSC para a amostra do fornecedor 1, apresentados no diagrama da Figura 36, demonstrou que a temperatura de transição indicada pelo fornecedor foi encontrada. A temperatura final da transformação austenítica foi de $-11,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, dentro da margem entre $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ indicada pelo fabricante.

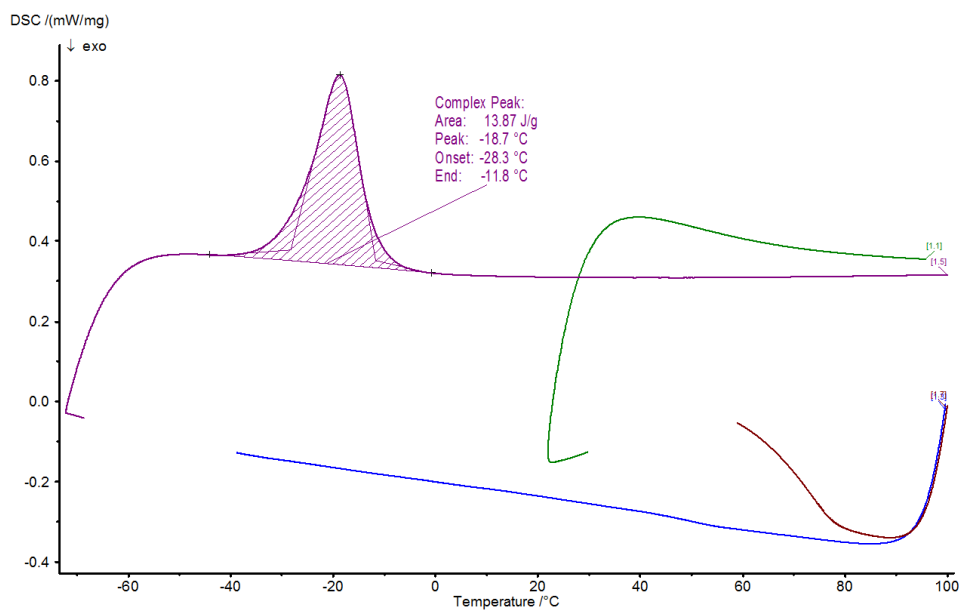


Figura 36 - Resultado do DSC para amostra do fornecedor 1.

O resultado do DSC para a amostra do fornecedor 2, apresentado na Figura 37, não foi conclusivo. A dificuldade de se preencher a superfície do cadinho de alumínio com uma quantidade menor que 45 mg do material podem ter contribuído, uma vez que os pedaços do material utilizado eram bem superiores ao do outro fornecedor devido principalmente à diferença de diâmetros que dificulta o corte. Eventuais mudanças na temperatura de transformação durante o tratamento para a retirada de tensões não são descartadas.

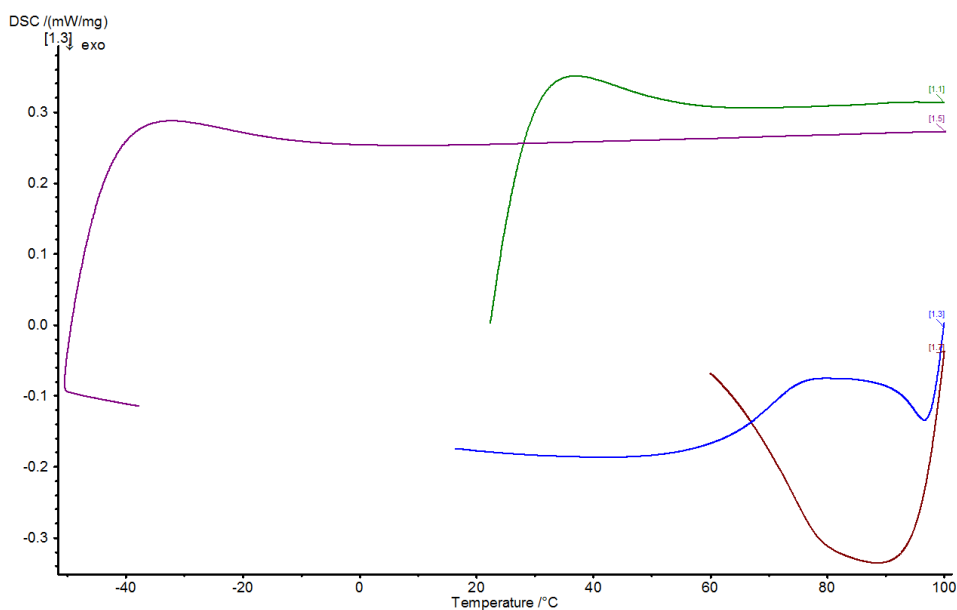


Figura 37 - Resultado do DSC para amostra do fornecedor 2.

4.3. Resultado da digestão atômica da liga de Níquel-Titânio

O primeiro passo foi testar a digestão das amostras em diferentes ácidos ou solução ácida. Dessa forma, conforme a Tabela 18, foram testadas três amostras que foram mergulhadas ou em ácido nítrico ou em ácido clorídrico ou ainda em água régia.

Tabela 18 - Amostras e respectivos ácidos/soluções ácidas testadas para digestão

Amostra	Massa (g)	Acido
A	0,0533	Nítrico
B	0,0493	Água régia (HNO ₃ +HCl 3:2)
C	0,0518	Clorídrico

As amostras foram mergulhadas em 25 ml dos respectivos ácidos ou solução, permanecendo por 24 horas. A amostra “A” e a amostra “C” apresentaram bolhas se formando logo após serem mergulhadas, demonstrando, assim, uma tendência de corrosão em ácido nítrico e clorídrico.

Após o período de reação estabelecido, observou-se que o ácido clorídrico teve uma excelente resposta, com a amostra perdendo 62,5% de sua massa original. O teste com ácido nítrico foi o que teve resultado mais modesto, perdendo apenas 0,9% de sua massa. O teste com a água régia também não foi tão positivo, com uma perda de massa de apenas 2,83% da massa original, como apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Perda de massa em cada amostra após 24 horas mergulhadas nas respectivas soluções

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa %	Ácido
A	0,0533	0,0528	0,9	Nítrico
B	0,0493	0,0479	2,83	Água régia (HNO ₃ +HCl 3:2)
C	0,0518	0,0194	62,5	Clorídrico

A partir da boa resposta com o ácido clorídrico, deu-se continuidade a digestão da liga, obtendo-se os dados a partir das amostras da Tabela 20, apresentado um resultado com cerca de 10% a mais de Níquel absoluto do que foi informado pelo fornecedor. Embora muito longe do que foi fornecido pelo fabricante, os resultados obtidos não foram tão distantes um dos outros, tendo-se uma diferença absoluta inferior a 3% do maior valor obtido para o menor.

Tabela 20 - Resultado do percentual de Níquel obtido pela digestão atômica

Amostra	% de Ni
1	65,24867
2	65,86014
3	67,52274
4	68,09472

Houve, possivelmente, um erro do tipo sistemático, tendo em vista que os valores, embora muito distantes do fornecido pelo fabricante (56,08%), apresentam certa repetibilidade.

4.4. Resultados para os Ensaio de Tração

Após a execução dos ensaios para todas as configurações do compósito híbrido fabricado foi possível observar as propriedades que são apresentadas nas Tabelas 21-24, a seguir. Os dados obtidos experimentalmente foram tratados e as curvas de tensão-deformação de todos os provetes são apresentados no Anexo I.

Tabela 21 - Resultados para o ensaio de tração SF.

Nome	Tensão Máx [MPa]	Deformação [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
1SF	324.42	1.73	23.63
2SF	322.58	1.83	21.75
3SF	313.80	1.89	19.60
4SF	404.96	1.96	25.00
5SF	312.99	1.66	24.34
Média	335.75	1.81	22.87
Desvio Padrão	39.02	0.12	2.19
Faixa	91.97	0.30	5.40

Os dados apresentados para os provetes sem fio são de grande valia para a comparação com resultados obtidos nos compósitos com frações volumétricas de NiTiInol em sua composição. Além disso, é uma importante informação já que não foram encontradas na biblioteca do IPB informações técnicas sobre a manta de fibra de carbono utilizada.

Os valores de tensão máxima e módulo de elasticidade encontrados são bem inferiores aos encontrados na literatura sobre fibras de carbono. A grande diferença deste para outros estudos em compósitos que utilizam a fibra de carbono como reforço está na matriz, onde grande parte dos estudos se trabalham com a combinação fibra de carbono em uma matriz de epóxi. Ainda assim, não se presumia valores tão baixos uma vez que os esforços de tração devem ser sustentados apenas pela fibra, com a matriz funcionando apenas como uma sustentação ao compósito.

Tabela 22 – Resultados para o ensaio de tração C1F.

Nome	Tensão Máx [MPa]	Deformação [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
1C1F	358.50	1.91	23.02
2C1F	359.13	2.03	18.38
3C1F	391.28	1.92	25.91
4C1F	367.33	2.04	21.27
5C1F	404.51	2.14	21.06
Média	376.15	2.01	21.93
Desvio Padrão	20.69	0.09	2.78
Faixa	46.02	0.23	7.54

Analisando apenas os dados obtidos para os provetes do compósito com 1 fio de NiTiNol na composição, não se constatou nenhuma grande variação quanto as propriedades de tensão máxima, deformação e o módulo de elasticidade entre eles. Desta maneira, quando comparados com os resultados obtidos nos provetes sem fios de NiTiNol nota-se um aumento de 12.03 % na média da tensão máxima e 11.05 % na média da deformação máxima. Por outro lado, o módulo de elasticidade teve uma queda de -4.11 %.

Tabela 23 - Resultados para o ensaio de tração C2F.

Nome	Tensão Máx [MPa]	Deformação [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
1C2F	320.17	2.27	16.39
2C2F	344.55	1.94	22.86
3C2F	355.78	2.09	21.50
4C2F	358.65	2.24	17.86
5C2F	345.37	1.95	21.70
Média	344.90	2.10	20.06
Desvio Padrão	15.16	0.15	2.78
Faixa	38.48	0.33	6.46

Os resultados para os provetes com 2 fios de NiTiNol na composição também não mostraram grandes variações entre si, com valores de faixa dentro de um limite aceitável. De forma análoga, comparando-se os valores médios destes com os provetes sem fios de NiTiNol obteve-se um aumento de 2.73 % na tensão máxima e 16.02 % na deformação máxima. E, assim como anteriormente, teve uma diminuição no módulo de elasticidade de -12.29 %.

Quando comparamos os resultados C1F e C2F, observa-se que o aumento da fração volumétrica de NiTinol não forneceu um aumento na tensão máxima e no módulo de elasticidade para o compósito, a diminuição em percentual foi de -8,31% e -8,53%. Porém, a deformação máxima aumentou em 4.48% com a adição de mais um fio de NiTinol na composição.

Tabela 24 - Resultados para o ensaio de tração C3F.

Nome	Tensão Máx [MPa]	Deformação [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
1C3F	305.66	1.94	16.49
2C3F	252.55	1.31	24.78
3C3F	378.88	1.74	27.83
4C3F	356.32	1.85	25.72
5C3F	316.21	2.57	15.79
Média	321.92	1.88	22.12
Desvio Padrão	48.83	0.46	5.58
Faixa	126.33	1.26	12.04

Entre os quatro casos de montagem/fabrico do compósito, os provetes C3F foram os que apresentaram as maiores variações dos resultados entre si, sendo difícil analisar um padrão. Os valores médios são de baixa fiabilidade pois, como pode-se ver na Tabela 23, os valores para faixa são bem elevados.

No estudo de Gupta [56], também foi observado a redução na resistência à tração transversal após a incorporação de fios EMF no compósito. Os autores chegaram à conclusão de que esta redução ocorre, principalmente, pelo tratamento de superfície dado aos fios para ligação de interface com a resina. Portanto, o tratamento de superfície dos fios é muito importante para obter propriedades equivalentes entre compósitos híbridos com fios EMF e os compósitos sem a incorporação desses fios.

No caso do presente estudo, sugere-se que a adição de fios de NiTinol no compósito pode aumentar as propriedades de tração transversal. Porém, a incorporação de maiores frações volumétricas desses fios no compósito pode ocasionar problemas de adesividade entre a matriz, o reforço de fibra de carbono e os próprios fios, fazendo com que a resistência à tração diminua ou, em casos exclusivos, se mantenha igual mesmo que se incluam os fios na composição.

Na Figura 38, é ilustrado o resultado para as tensões máximas para cada tipo de provete. Nota-se, mais uma vez, que a adição de fios melhorou esta propriedade no material estudado. Porém, no compósito C3F observa-se um grande valor de desvio padrão nos resultados e valores de tensão máxima menores que os encontrados no compósito SF. Problemas referentes ao fabrico, sobretudo na questão da adesividade do compósito não são descartados para se justificar o erro entre os resultados obtidos para o compósito C3F.

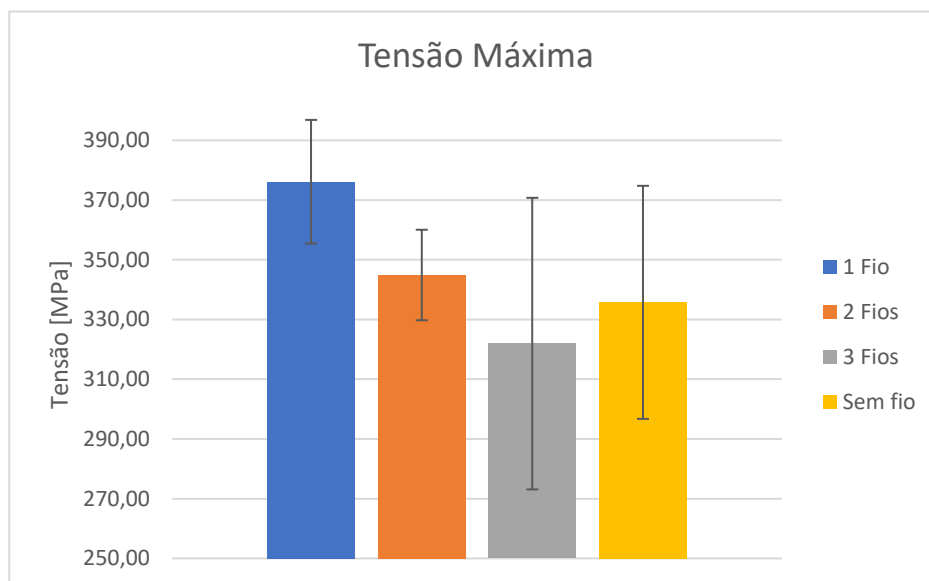


Figura 38 – Gráfico das tensões máximas.

Analisando-se a deformação máxima nos quatro tipo de compósitos, pode-se observar que a deformação máxima em média aumentou com o aumento do número de fios na composição. Com destaque para o compósito C2F que apresentou dois provetes com resultados acima de 2.20 % de deformação. E, assim como no caso da tensão máxima, o compósito C3F apresentou os piores resultados em média, apesar de um dos provetes C3F ter apresentado a maior deformação entre todos os outros provetes ensaiados. A Figura 39, apresenta graficamente os resultados para deformação máxima para as diferentes configurações propostas neste trabalho.

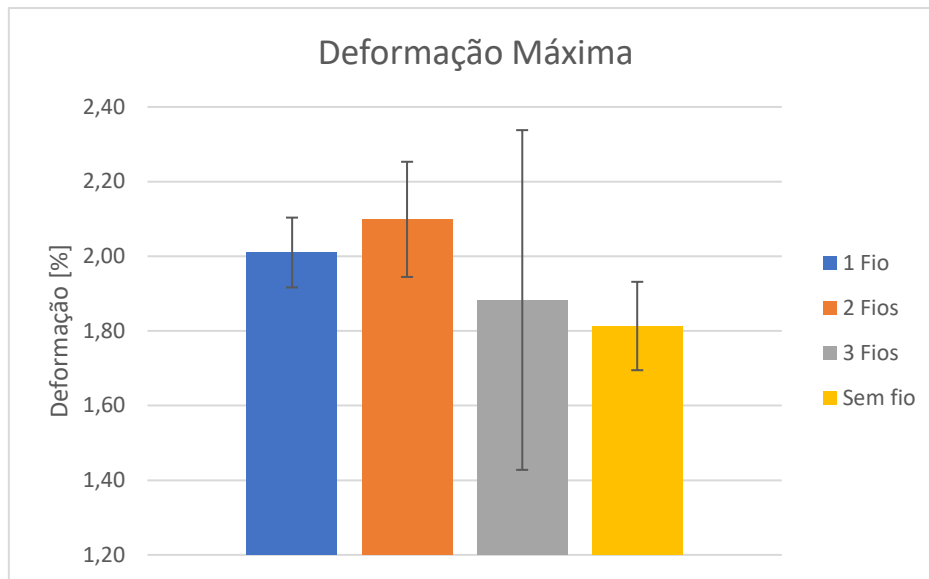


Figura 39 – Gráfico das deformações máximas.

Os resultados encontrados podem ser comparados com os resultados de outro estudo que envolve compósitos híbridos reforçados com fibra de carbono e fios de NiTi. A Tabela 25 mostra os resultados obtidos por Muralidharan [57] nos ensaios de tração para o compósito de fibra de carbono com resina epóxi com fios de NiTinol (CFSMA) e o compósito com a mesma composição porém sem os fios de NiTinol (CF).

Tabela 25 – Resultados para o ensaio de tração de Muralidharan [57].

	CF	CFSMA
Área [mm ²]	25 x 2.3	25 x 3
Força Máxima [kN]	45.29	111.81
Tensão Última [MPa]	905.72	1490.83
Deformação Máxima	0.222	0.122

Os valores apresentados são muito superiores aos encontrados no presente estudo. Segundo o autor, a adição de 5% de fios de NiTi no compósito fez com que a tensão última aumentasse em 65% e a deformação diminuísse em -45%. Vale ressaltar que pesquisas sobre ensaios de tração em compósitos com a composição exata deste estudo com resina de poliéster, fibra de carbono e NiTinol são bastante escassos.

4.5. Resultado das Regras das Misturas

De acordo com as dimensões dos provetes, apresentados anteriormente nas Tabelas 13-16, e o diâmetro do fio de NiTinol ($d = 0.25$ [mm]) foi possível estimar o

volume do compósito (poliéster + fibra de carbono) e o volume do fio de NiTiInol, para se calcular a fração volumétrica de fio no compósito híbrido segundo a Equação 33.

$$V_{fio} = \frac{n^{\circ} \text{ de fios} \times \pi \times \frac{d_{fio}^2}{4} \times DEG}{l_m \times e_m \times DEG} \quad (33)$$

Os valores dos módulos de elasticidade para o compósito e o fio de NiTiInol são de 22,87 [GPa] e 39,03 [GPa], respectivamente, e foram definidos de acordo com os ensaios experimentais realizados anteriormente. Com estes dados e utilizando as Equações 7 e 8, pode-se encontrar o limite inferior e superior para a estimativa do módulo de elasticidade do compósito híbrido pelas regras da mistura de Voigt e Reuss, apresentados nas Tabelas 26-28.

Tabela 26 – Resultado para as regras das misturas do compósito com 1 fio de NiTi.

Nome	V_{fio} (%)	Voigt [MPa]	Reuss [MPa]	Ensaio [MPa]
1C1F	0,44	22941,2	22911,8	23020,6
2C1F	0,42	22937,5	22909,6	18377,0
3C1F	0,46	22944,6	22913,8	25914,4
4C1F	0,43	22940,3	22911,3	21266,3
5C1F	0,45	22942,0	22912,3	21061,2

Com os resultados obtidos a partir destas regras da mistura pôde-se observar que a adição de 1 fio de NiTiInol em um compósito de matriz de poliéster reforçado com fibra de carbono pode fornecer um aumento entre 0,20-0,33% no módulo de elasticidade segundo as equações de Voigt e Reuss.

Tabela 27 - Resultado para as regras das misturas do compósito com 2 fios de NiTi.

Nome	V_{fio} (%)	Voigt [MPa]	Reuss [MPa]	Ensaio [MPa]
1C2F	0,75	22991,2	22941,2	16394,6
2C2F	0,87	23009,8	22952,2	22857,3
3C2F	0,88	23011,7	22953,3	21504,1
4C2F	0,77	22993,7	22942,7	17855,0
5C2F	0,85	23006,6	22950,4	21698,6

Semelhante ao cálculo realizado anteriormente, o aumento percentual do módulo de elasticidade com a adição de 2 fios de NiTiInol é de 0,36-0,60 %.

Tabela 28 - Resultado para as regras das misturas do compósito com 3 fios de NiTi.

Nome	V _{fio} (%)	Voigt [MPa]	Reuss [MPa]	Ensaio [MPa]
1C3F	1,13	23053,1	22977,8	16491,0
2C3F	1,38	23092,9	23001,4	24776,6
3C3F	1,58	23125,2	23020,5	27832,6
4C3F	1,39	23094,7	23002,5	25719,1
5C3F	1,11	23049,6	22975,7	15792,1

De forma análoga, com a adição de 3 fios de NiTiInol no compósito o aumento no módulo de elasticidade é estimado em 0,56-0,95 %.

Quando comparados com os resultados obtidos experimentalmente, observamos que não foram respeitados os limites superior e inferior da estimativa para o módulo de elasticidade. Os erros de cada provete para cada regra da mistura são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Erros percentuais C1F.

Nome	E _{Voigt} [%]	E _{Reuss} [%]
1C1F	0.35	0.47
2C1F	24.82	24.66
3C1F	11.46	11.58
4C1F	7.87	7.74
5C1F	8.93	8.79
1C2F	40.24	39.93
2C2F	0.67	0.42
3C2F	7.01	6.74
4C2F	28.78	28.49
5C2F	6.03	5.77
1C3F	39.79	39.34
2C3F	6.80	7.16
3C3F	16.91	17.29
4C3F	10.20	10.56
5C3F	45.96	45.49

Apesar de nenhum resultado do ensaio estar dentro do limite superior e inferior proposto neste trabalho segundo as regras da mistura de Voigt e Reuss, temos que em alguns ensaios o erro percentual foi baixo. Logo, pode-se dizer que estas regras trazem uma boa estimativa para as propriedades deste compósito híbrido. Vale ressaltar que estas regras não levam em consideração as imperfeições que podem ocorrer na ligação entre os reforços e a matriz e, também, que não existem vazios no compósito. Porém, já foi constatado que pode ter ocorrido problemas na interface e os erros percentuais apresentados podem estar relacionados a este problema.

De forma semelhante, mas desta vez utilizando os valores para deformação máxima de 31,17% para o fio de NiTi e 1.81% para o compósito de matriz de poliéster reforçado com fibra de carbono, encontrados experimentalmente, obtemos os seguintes resultados (Tabela 30) para a estimativa da deformação máxima seguindo as regras das misturas.

Tabela 30 – Estimativa da deformação máxima pelas Regras da Mistura.

Nome	D_{Voigt} [%]	D_{Ensaio} [%]	D_{Reuss} [%]
1C1F	1.95	1.91	1.82
2C1F	1.94	2.03	1.82
3C1F	1.95	1.92	1.82
4C1F	1.94	2.04	1.82
5C1F	1.95	2.14	1.82
1C2F	2.04	2.27	1.83
2C2F	2.07	1.94	1.83
3C2F	2.08	2.09	1.83
4C2F	2.04	2.24	1.83
5C2F	2.07	1.95	1.83
1C3F	2.15	1.94	1.83
2C3F	2.23	1.31	1.84
3C3F	2.29	1.74	1.84
4C3F	2.23	1.85	1.84
5C3F	2.15	2.57	1.83

Estes resultados foram melhores do que os apresentados quando se estudado a estimativa para o módulo de elasticidade pois, no caso da deformação máxima, foram

encontrados valores dentro dos limites previstos pelas regras da mistura. Os valores fora da faixa estimada, tirando algumas exceções, ainda são próximos dos propostos pelas regras.

4.6. Resultado do Modelo Matemático de Liu

Para utilização do código foram inseridos como parâmetros de entrada os módulos de elasticidade do compósito e do fio de NiTiNol encontrados experimentalmente; as propriedades geométricas dos provetes com os fios; os módulos de Poisson encontrados na literatura [58], [59]; e os módulos de corte e de volume obtidos segundo as Equações 34 e 35.

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (34)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (35)$$

Após inserção dos valores de entrada, obteve-se os resultados estimados do módulo de elasticidade e o módulo de corte para o compósito híbrido apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Resultados do módulo de elasticidade e módulo de corte obtidos através do método elaborado por Liu [52].

Nome	Módulo de Elasticidade [GPa]	Módulo de Corte [GPa]
C1F	19.16	6.88
C2F	19.20	6.90
C3F	19.24	6.92

Os módulos de elasticidade obtidos por este método se mostraram inferiores aos obtidos experimentalmente em todos os casos. Os erros percentuais deste método para o resultado obtido experimentalmente são de 12,62% para o compósito híbrido com 1 fio, 4,32% para o compósito híbrido com 2 fios e 13.01% para o compósito híbrido com 3 fios. Quanto ao módulo de corte não foram realizados ensaios experimentais para comparar com os resultados do algoritmo. Os gráficos do progresso das propriedades de acordo com o número de interações encontram-se presentes no Anexo II.

4.7. Resultado do Método dos Elementos Finitos (Ansys®)

Após a realização da simulação pelo MEF, foi-se verificado que dentre os tipos de ligação apenas a “*No Separation*” apresentou resultados plausíveis tanto para deformação quanto para a tensão normal. As ligações “*Bonded*” e “*Rough*” quando analisadas as tensões máximas foi observado valores absurdos (com desvio de mais de 800% em um caso), porém para a deformação apresentaram valores mais aceitáveis apesar de ainda elevados. Os desvios percentuais dos resultados da simulação são apresentados na Tabela 32 em comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

Tabela 32 - Desvio percentual dos resultados encontrados por MEF em relação aos dados obtidos experimentalmente nos ensaios de tração.

Configuração	Método	Deformação (%)	Tensão normal (%)
C1F	<i>Bounded</i>	35.6	14.6
	<i>No separation</i>	35.4	26.9
	<i>Rough</i>	35.3	66.1
C2F	<i>Bounded</i>	27.7	-
	<i>No separation</i>	26.1	6.2
	<i>Rough</i>	27.3	-
C3F	<i>Bounded</i>	12.5	-
	<i>No separation</i>	9.7	11.6
	<i>Rough</i>	11.9	-

Estes resultados sugerem que esta simulação numérica necessita de ajustes para que seja considerada como uma boa estimativa para o comportamento do compósito híbrido estudado. Porém já mostra alguns bons resultados, sobretudo em relação à deformação. O tipo de contacto *No Separation* representa o melhor método dentre os propostos neste trabalho para simulação por MEF.

CONCLUSÃO

- **Análise Metalográfica**

Com a realização da análise metalográfica foi possível se observar os contornos de grãos dos fios de Níquel-Titânio. Os grãos não apresentaram diferenças consideráveis na sua geometria quando submetidos a deformação plástica;

- **DSC**

A caracterização térmica por DSC apresentou resultados parcialmente completos, devido às limitações do equipamento para temperaturas inferiores a -50 °C, obtendo somente as temperaturas de transição Af e As;

Uma vez que os resultados foram obtidos através do DSC conclui-se que as técnicas e medidas metalográficas bem como o tratamento do material segundo a norma podem ser padronizados para futuras experiências;

- **Digestão Atômica**

É possível realizar a digestão do NiTinol em ácido clorídrico, mas os resultados da composição não apresentaram resultados satisfatórios para uma liga em que se necessita obter a composição química com uma precisão de duas casas decimais;

- **Ensaio de Tração do Compósito Híbrido**

As adaptações realizadas e o passo a passo criado para o processo de fabrico do compósito híbrido foram um sucesso, permitindo que fosse possível a realização do ensaio de tração;

Os resultados do ensaio mostraram que o acréscimo de fios melhorou as propriedades de deformação máxima e tensão máxima do compósito sem os fios, com exceção da configuração com 3 fios de NiTinol que apresentou os piores resultados para tensão máxima. Por outro lado, notou-se uma diminuição do módulo elástico para o compósito com os fios;

Concluiu-se que o aumento da espessura sugere uma queda no módulo de elasticidade, sendo um importante fator a ser estudado na hora do fabrico do compósito híbrido.

- **Regras da Mistura**

As regras da mistura, elaboradas por Voigt e Reuss, se mostraram como uma boa alternativa para se estimar as propriedades de deformação máxima e o módulo de elasticidade. Apesar de não representarem os limites superior e inferior para os resultados

obtidos experimentalmente, os desvios percentuais encontrados são satisfatórios sendo menores que 1% em alguns casos.

- **Modelo Matemático da Regra da Mistura (Liu)**

A partir do código elaborado no Matlab foi possível aplicar o método passo a passo elaborado por Liu (1998). Os valores encontrados por este método foram todos inferiores aos encontrados experimentalmente com defasagem de 12,62% para o compósito híbrido com 1 fio, 4,32% para o compósito híbrido com 2 fios e 13,01% para o compósito híbrido com 3 fios. Apesar destes valores, as regras da mistura de Voigt e Reuss apresentaram melhores resultados para estimativa das propriedades.

- **Simulação com MEF**

Os resultados da simulação numérica mostraram que ainda é preciso realizar ajustes para se obter resultados mais precisos. Utilizando o método *No Separation* de contacto entre os materiais, obteve-se os melhores resultados com valores que chegaram a apenas 6,2% de erro para tensão normal na configuração C2F e 9,7% e 11,6% de erro na deformação e tensão normal, respetivamente, na configuração C3F.

Para trabalhos futuros recomenda-se as seguintes possibilidades:

-Realizar ajustes e refinamentos necessários no Ansys® para a simulação numérica por MEF;

-Realizar ensaios mecânicos de compressão, flexão, absorção de impacto e vibração nos provetes de compósito híbrido reforçado com NiTi e fibra de carbono;

-Verificar a zona de interface entre o reforço de NiTi e a matriz para se compreender melhor a questão da adesividade e suas influências;

-Fabricar compósitos com maiores frações volumétricas de fios de NiTi e analisar a tendência de resposta;

-Estudar as possíveis aplicações para este tipo de compósito híbrido a partir das propriedades mecânicas obtidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. S. Antunes, J. P. V. Tosetti, and J. Otubo, “*High shape recovery Ni – Ti SMA wire produced from electron beam melted ingot,*” *J. Alloys Compd.*, vol. 577, pp. S265–S267, 2013, doi: 10.1016/j.jallcom.2012.03.043.
- [2] N. K. Simha, P. S. R. Sreekanth, and S. B. V. Siva, *Shape-Memory Alloys*, vol. 214. Elsevier Ltd., 2017.
- [3] A. D. S. Antunes, “*Influencia da transformação de fase, do ângulo de trefilação e da redução de área na trefilação nas características de efeito de memória de forma nos fios de NiTi.*” 2015.
- [4] A. Mwangi, J. W., Nguyen, L. T., Bui, V. D., Berger, T., Zeidler, H., & Schubert, “*Nitinol manufacturing and micromachining: A review of processes and their suitability in processing medical-grade nitinol,*” *J. Manuf. Process.*, vol. 38, pp. 355–369, 2019.
- [5] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4th ed. WILEY, 2010.
- [6] S. K. Mazumdar, *Composites Manufacturing*. CRC PRESS, 2002.
- [7] F. L. Neto and L. C. Pardini, *Compósitos Estruturais*, 2ª edição. São Paulo, 2016.
- [8] M. A. M. Rodrigues, “*Furação Orbital de Compósitos Híbridos Aço/CFRP,*” 2018.
- [9] A. Paiva, “*Modelagem do Comportamento Termomecânico das Ligas com Memória de Forma,*” 2004.
- [10] D. C. Lagoudas, *Shape Memory Alloys*. New York: Springer, 2008.
- [11] H. Huang, W. M., Ding, Z., Wang, C. C., Wei, J., Zhao, Y., & Purnawali, “*Shape memory materials. Materials Today,*” vol. 13(7–8), pp. 54–61, 2010.
- [12] V. Piccirillo, “*Dinâmica não linear e controle de um sistema vibratório modelado com memória de forma e, excitado por fontes de energia do tipo ideal e não ideal,*” *Aleph*, 2007.
- [13] W. D. Callister, *Materials Science and Engineering - An Introduction*, 7th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2007.

- [14] O. D. S. Santos, “*Propriedades de efeito de memória de forma e superelasticidade da liga NiTi com distintos teores de carbono e oxigênio,*” 2014.
- [15] J. M. Jani, M. Leary, A. Subic, and M. A. Gibson, “*A review of shape memory alloy research, applications and opportunities.*” 2014.
- [16] K. Otsuka and C. M. Wayman, *Shape Memory Materials*. Cambridge: Cambridge Press, 1998.
- [17] A. J. A. do Lago *et al.*, “*Caracterização de ligas NiTi com efeito de memória de forma,*” *Rev. Mil. Ciência e Tecnol.*, vol. 33, no. 2, pp. 93–95, 2016.
- [18] J. W. Mwangi, L. T. Nguyen, V. D. Bui, T. Berger, H. Zeidler, and A. Schubert, “*Nitinol manufacturing and micromachining: A review of processes and their suitability in processing medical-grade nitinol,*” *J. Manuf. Process.*, vol. 38, pp. 355–369, 2019.
- [19] J. C. Hilário, “*Análise numérico-experimental do comportamento superelástico das ligas Níquel-Titânio com memória de forma,*” Instituto Politécnico de Bragança., 2019.
- [20] S. Datta, M. S. Raza, P. Saha, and D. K. Pratihari, “*Effects of Line Energy on Mechanical Properties, Corrosion and Shape Memory Behavior of Laser-Welded NiTi Joints,*” in *ASME 2018 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2018*, 2018.
- [21] A. Pandit, J. Planell, and M. Navarro, *Titanium and Nitinol (NiTi)*, Third Edit. Elsevier, 2013.
- [22] W. S. Castilho and E. P. Silva, “*Algumas Aplicações das Ligas com Memória de Forma,*” *Sinergia*, vol. 12, pp. 99–108, 2011.
- [23] L. F. Cupertino, “*Modelagem do Módulo de Young em Nanocompósitos através de Inteligência Computacional,*” p. 82, 2010, doi: <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.15391>.
- [24] M. J. L. Caetano, “*Resenha Histórica do Uso dos Materiais,*” *CTB*. [Online]. Available: <https://www.ctborracha.com/materiais-de-engenharia/resenha-historica-do-uso-dos-materiais/>. [Accessed: 15-Feb-2020].

- [25] A. Ventura, “Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas,” *Ciência Tecnol. dos Mater.*, vol. 21, no. 3–4, pp. 10–19, 2009.
- [26] S. de M. Tomar, “Comportamento mecânico de materiais compósitos de origem natural,” 2018.
- [27] F. F. M. C. Guamá, “Análise estrutural de cilindros revestidos de compósitos para armazenamento de gnv,” Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- [28] E. J. Siqueira, “Estudo dos critérios de falhas em compósitos pps / fibras de carbono utilizando elementos finitos,” p. 183, 2009.
- [29] H. Wiebeck and J. Harada, *Plásticos de Engenharia - Tecnologia E Aplicações*. São Paulo: Artliber Editora, 2005.
- [30] C. P. da S. Santos and J. R. R. Bichara, “Estudo Experimental das Propriedades Mecânicas para Compósito em Fibra de Carbono e Matriz Epóxi Pipefix (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer)” p. 81, 2015.
- [31] Y. Swolfs, L. Crauwels, E. Van Breda, L. Gorbatikh, P. Hine, and I. Ward, “Composites : Part A Tensile behaviour of intralayer hybrid composites of carbon fibre and self-reinforced polypropylene,” *Compos. PART A*, vol. 59, pp. 78–84, 2014, doi: 10.1016/j.compositesa.2014.01.001.
- [32] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. Özgür, and O. Çoban, “A review : Fibre metal laminates , background , bonding types and applied test methods,” vol. 32, pp. 3671–3685, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.03.011.
- [33] B. E. Leite, R. F. De Macedo, W. F. Amorim Júnior, and C. J. J. De Araújo, “Processing methodology to embedding NiTi shape memory fibers into a polymer-based composite plate,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 643, pp. 1–5, 2010, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.643.1.
- [34] A. Cohades and V. Michaud, “Shape memory alloys in fibre-reinforced polymer composites,” *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, vol. 1, no. 1, pp. 66–81, 2018, doi: 10.1016/j.aiepr.2018.07.001.
- [35] C. A. Rogers, C. Liang, and C. R. Fuller, “Modeling of shape memory alloy hybrid composites for structural acoustic control,” vol. 89, no. June, pp. 210–220, 1990, doi: 10.1121/1.400503.

- [36] C. A. Rogers, “Active vibration and structural acoustic control of shape memory alloy hybrid composites : Experimental results,” vol. 88, no. June, pp. 2803–2811, 1990, doi: 10.1121/1.399683.
- [37] O. D. M. Junior and M. V. Donadon, “Aeroelastic Behavior of Stiffened Composite Laminated Plate with Embedded SMA Wire using Hierarchical Finite Element Method,” Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2017.
- [38] J. S. N. Paine and C. A. Rogers, “The response of SMA hybrid composite materials to low velocity impact,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 5, pp. 530–535, 1994.
- [39] C. J. de Araujo, L. F. A. Rodrigues, J. F. C. Neto, and R. P. B. Reis, “Fabrication and static characterization of carbon-fiber-reinforced polymers with embedded NiTi shape memory wire,” 2008, doi: 10.1088/0964-1726/17/6/065004.
- [40] K. Lau, H. Ling, and L. Zhou, “Low velocity impact on shape memory alloy stitched composite plates,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 13, pp. 364–370, 2004, doi: [https://doi.org/ 10.1088/0964-1726/13/2/015](https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/2/015).
- [41] M. C. M. Rodrigues, “Efeito do treinamento por ciclagem pseudoelástica nas propriedades mecânicas e funcionais de uma liga níquel-titânio,” Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.
- [42] ASTM, “Standard Test Method for Transformation Temperature of Nickel-Titanium Alloys by Thermal Analysis,” *October*. p. 5, 2004, doi: 10.1520/F2004-17.2.
- [43] C. G. Slough, “A Study of the Nitinol Solid-Solid Transition by DSC,” *TA Instruments*. pp. 1–5, 2007.
- [44] A. I. Vogel, *Vogel’s textbook of quantitative chemical analysis*, 5th ed. Longman Scientific & Technical, 1989.
- [45] A. Garcia, J. A. Spim, and C. A. Dos Santos, *Ensaio dos Materiais*, 2nd ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [46] S. A. de Souza, *Ensaio mecânicos de materiais metálicos - fundamentos teóricos e práticos*, 5th ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1982.

- [47] ASTM, “*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials,*” *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–13, 2017, doi: 10.1520/D3039.
- [48] ASTM, “*Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials 1,*” *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–10, 2015, doi: 10.1520/D7264.
- [49] G. T. V. Nobrega, “*Estudo de compósito híbrido de fibra de vidro e liga de Níquel-TiTânio,*” Instituto Politécnico de Bragança, 2020.
- [50] Z. T. Vilar, C. J. De Araujo, and A. G. Dos Santos, “*Estudo de propriedades dinâmico-mecânicas de um compósito aeronáutico de CFRP com fios de ligas com memória de forma embebidos,*” *Polimeros*, vol. 26, pp. 16–24, 2016, doi: 10.1590/0104-1428.1926.
- [51] N. Bouhfid *et al.*, *Numerical modeling of hybrid composite materials*. 2019.
- [52] G. R. Liu, “*A step-by-step method of rule-of-mixture of fiber- and particle-reinforced composite materials,*” vol. 40, pp. 313–322, 1998.
- [53] J. P. Pascon, “*Modelos constitutivos para materiais hiperelásticos: estudo e implementação computacional,*” Universidade de São Paulo - EE de São Carlos, 2008.
- [54] Á. F. M. Azevedo, *O Método Dos Elementos Finitos.*, 1^a., vol. 1. Porto, 2003.
- [55] R. M. De Souza, “*O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor,*” no. July, 2003, p. 40.
- [56] A. K. Gupta, R. Velmurugan, and M. Joshi, “*Mechanical characterization of pseudoelastic shape memory alloy hybrid composites,*” *ISSS J. Micro Smart Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 149–160, 2017, doi: 10.1007/s41683-017-0016-9.
- [57] S. Muralidharan, S. K. Sundareswaran, and B. Rajendran, “*Mechanical Characterization of Carbon Fibre Reinforced Polymer Embedded with Shape Memory Alloy Wires,*” vol. 14, no. 1001, pp. 2381–2386, 2020.

- [58] F. Nematzadeh and S. K. Sadrnezhaad, “*Effects of material properties on mechanical performance of Nitinol stent designed for femoral artery: Finite element analysis,*” *Sci. Iran.*, vol. 19, no. 6, pp. 1564–1571, 2012, doi: 10.1016/j.scient.2012.10.024.
- [59] I. Krucinska and T. Stypka, “*Direct measurement of the axial poisson’s ratio of single carbon fibres,*” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 41, no. 1, pp. 1–12, 1991, doi: 10.1016/0266-3538(91)90049-U.

ANEXO I

Este anexo tem como objetivo apresentar as curvas de tensão-deformação obtidas no ensaio de tração de todos os provetes para as diferentes configurações do compósito híbrido.

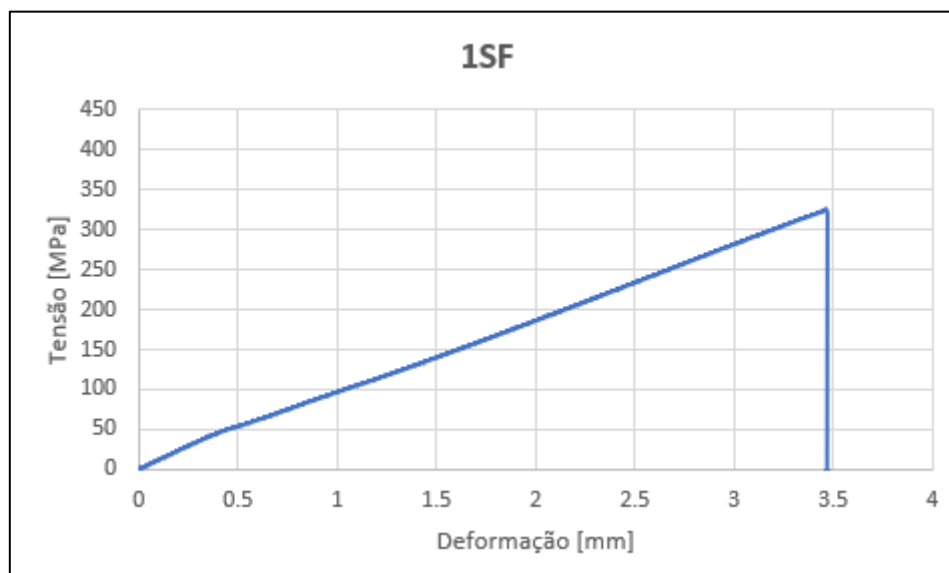


Figura A 1 – Gráfico tensão-deformação 1SF.

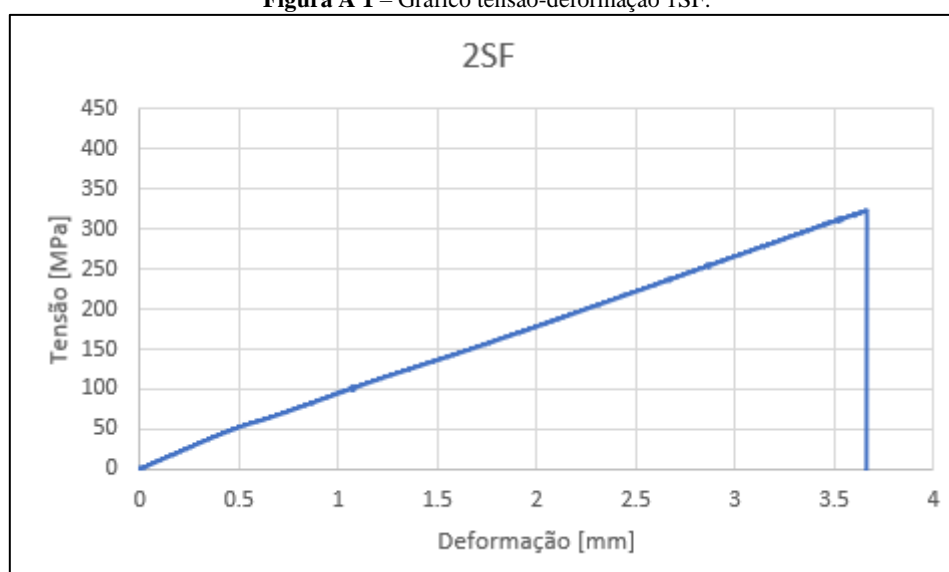


Figura A 2 - Gráfico tensão-deformação 2SF.

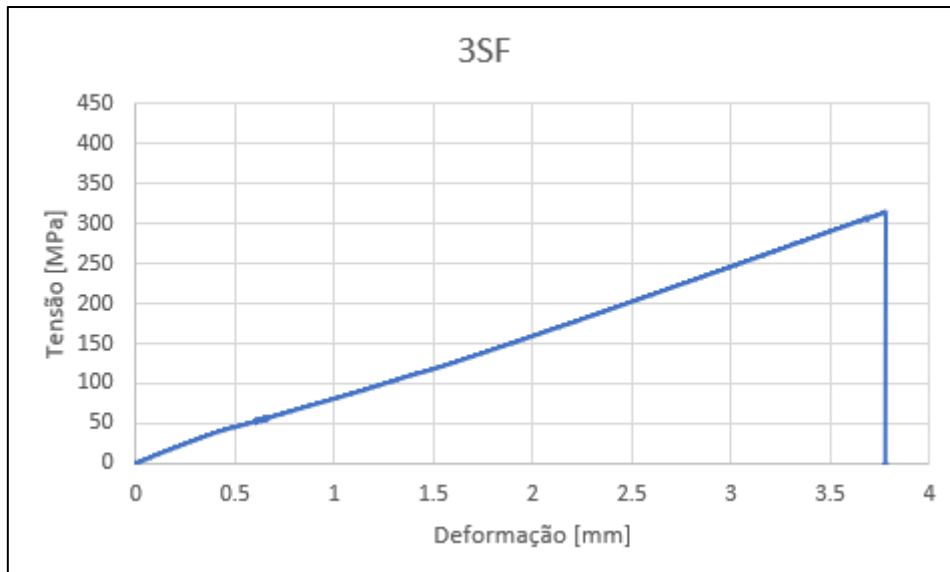


Figura A 3 - Gráfico tensão-deformação 3SF.

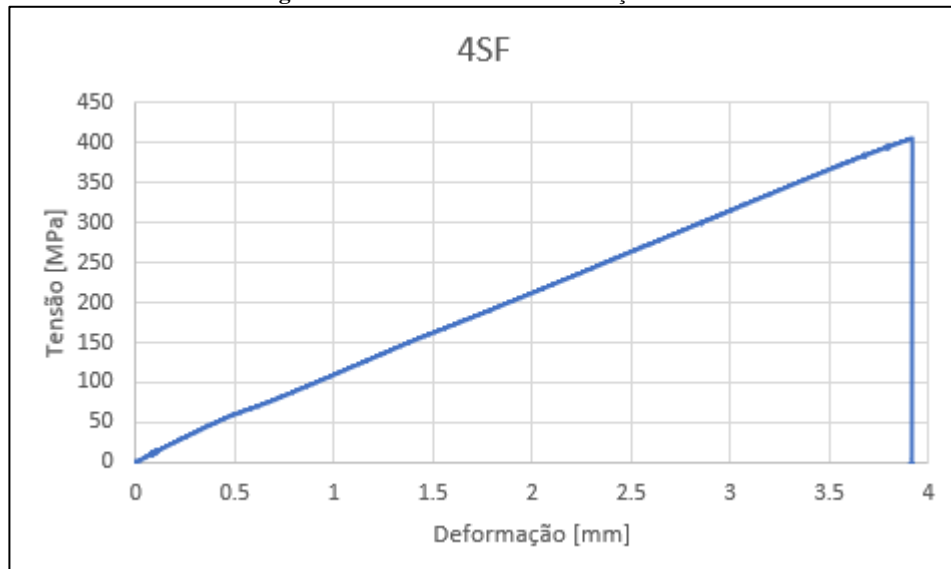


Figura A 4 - Gráfico tensão-deformação 4SF.

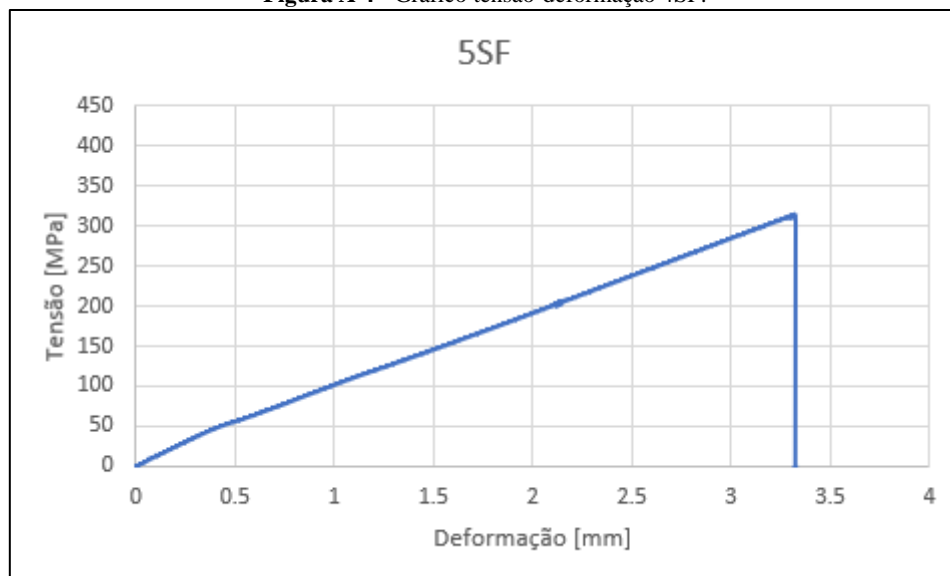


Figura A 5 - Gráfico tensão-deformação 5SF

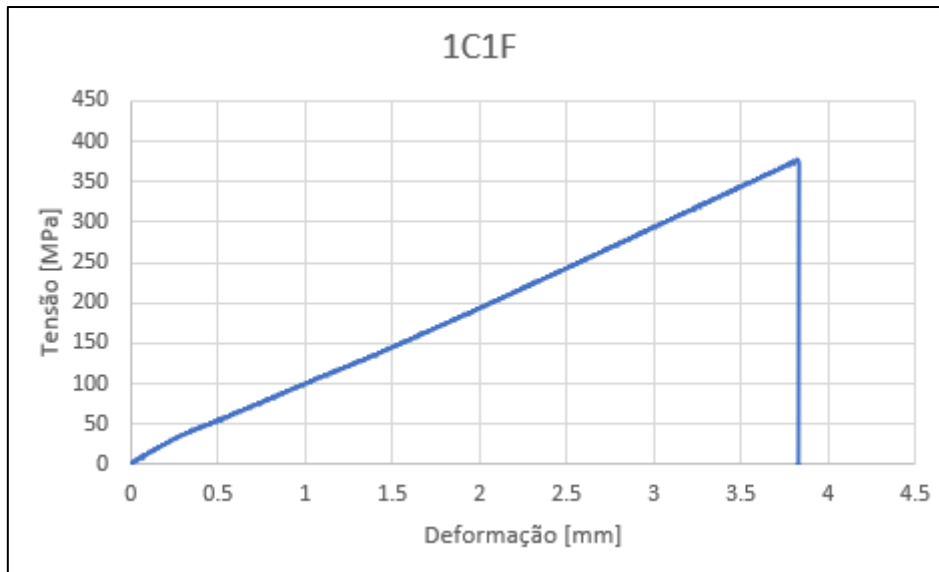


Figura A 6 - Gráfico tensão-deformação 1C1F.

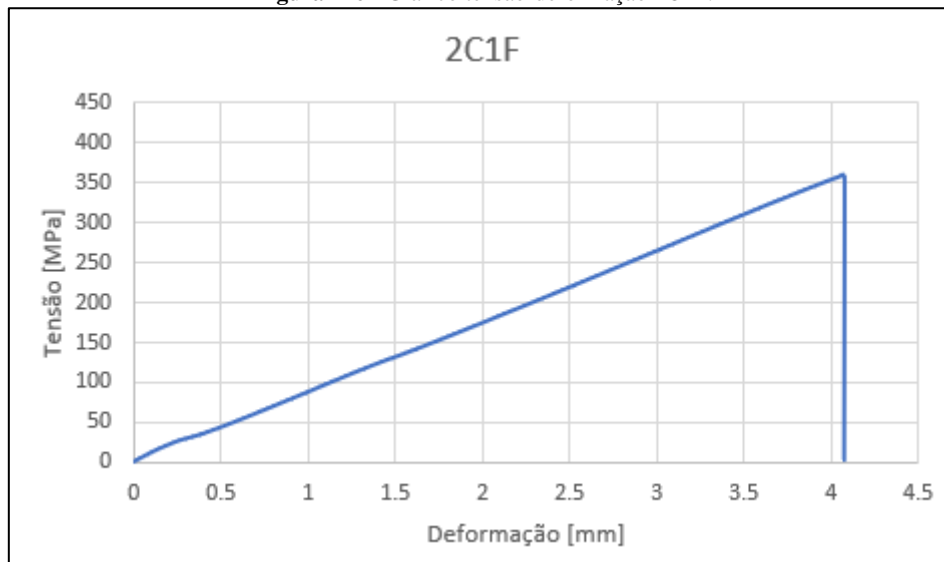


Figura A 7 - Gráfico tensão-deformação 2C1F.

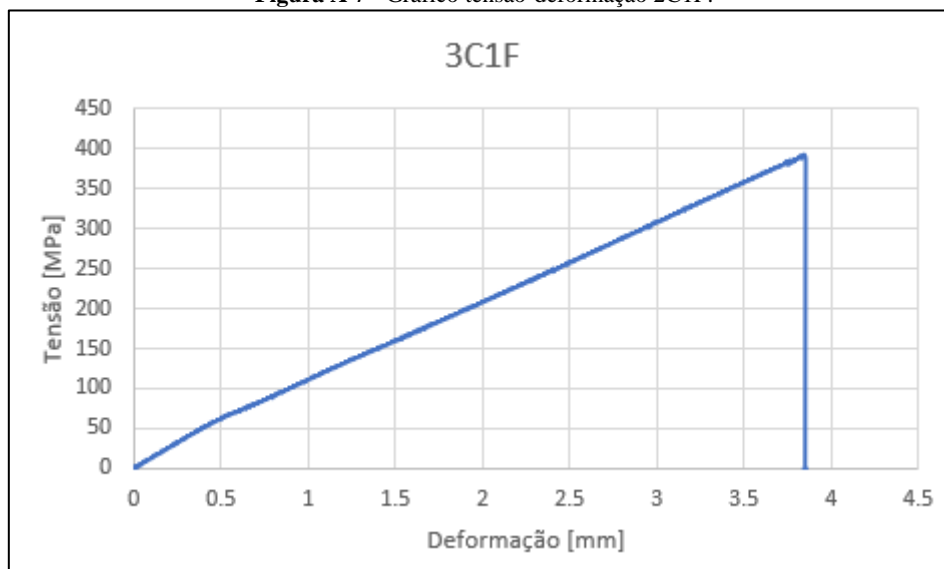


Figura A 8 - Gráfico tensão-deformação 3C1F.

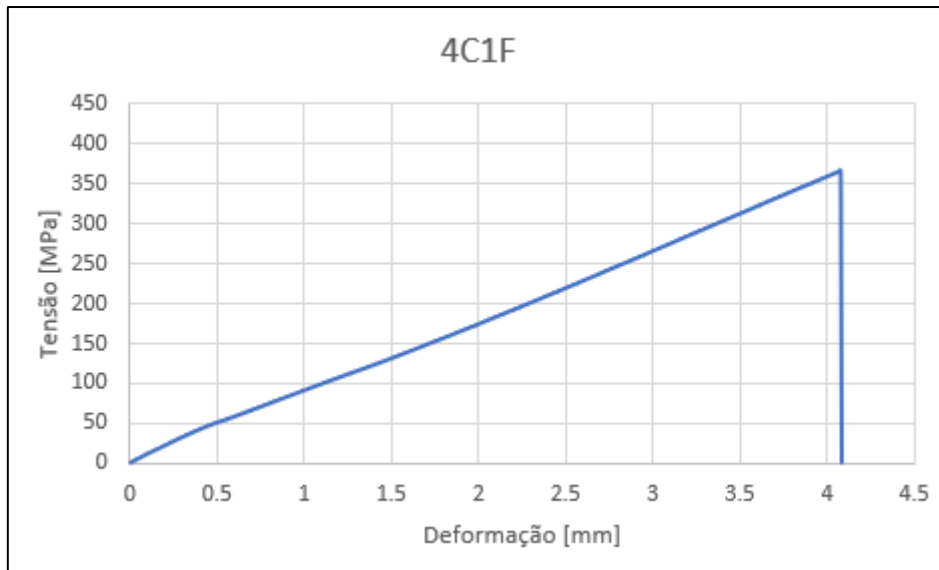


Figura A 9 - Gráfico tensão-deformação 4C1F.

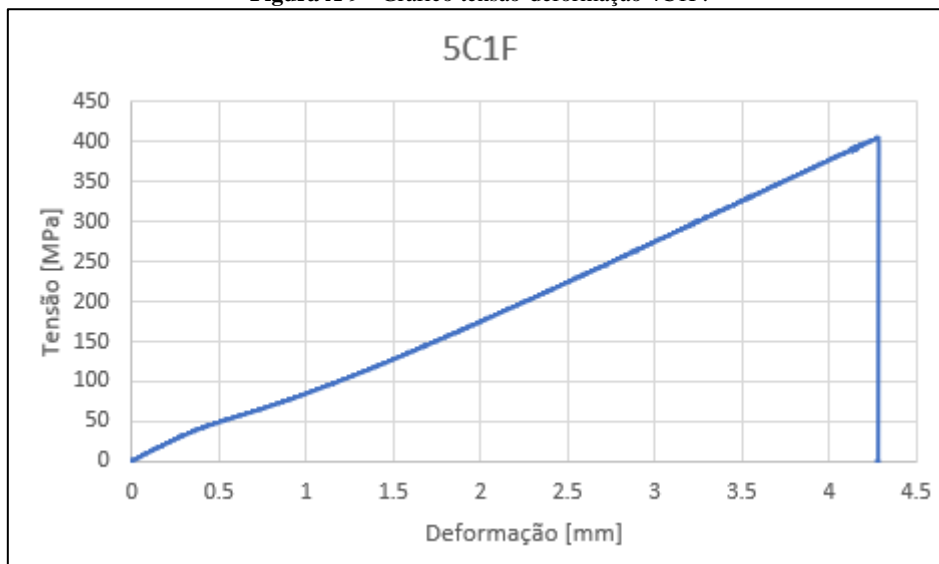


Figura A 10 - Gráfico tensão-deformação 5C1F.

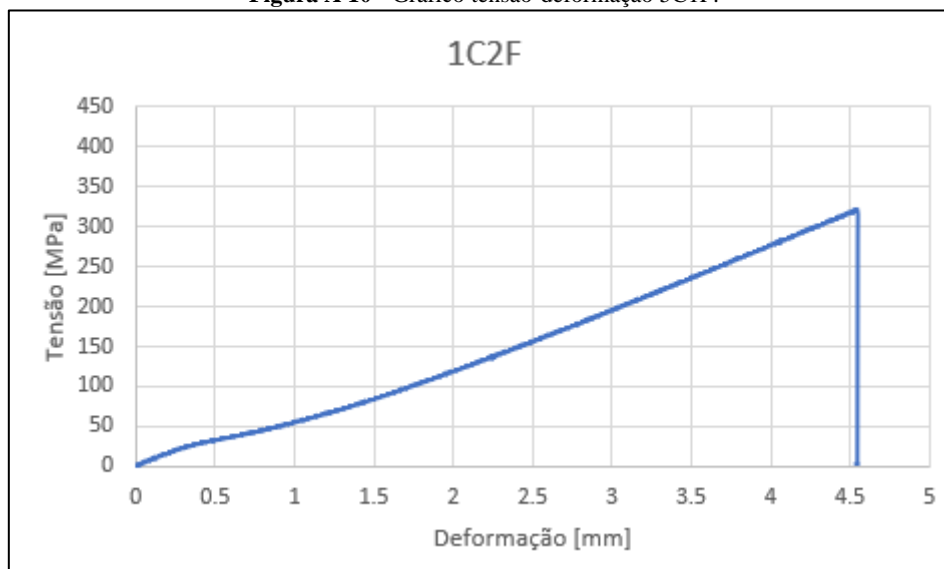


Figura A 11 - Gráfico tensão-deformação 1C2F.

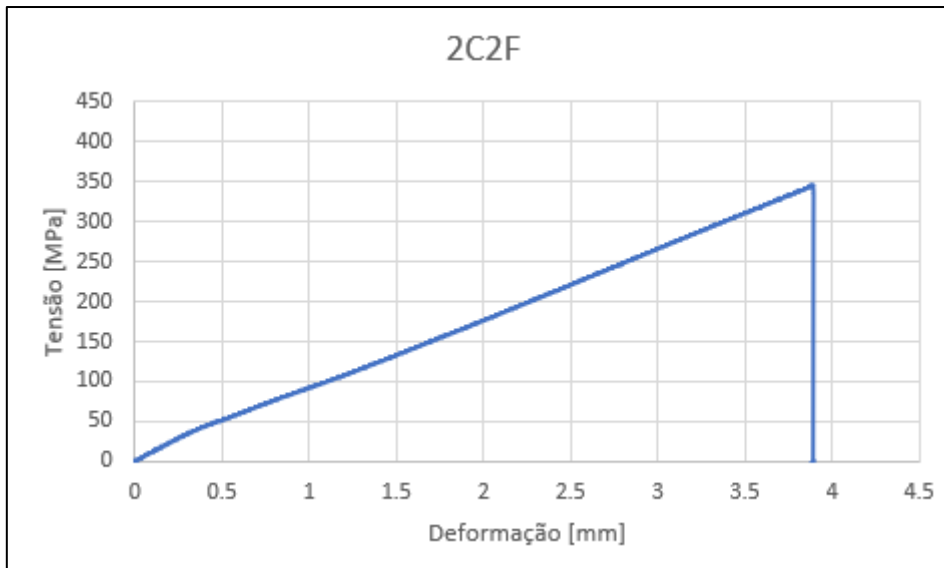


Figura A 12 - Gráfico tensão-deformação 2C2F.

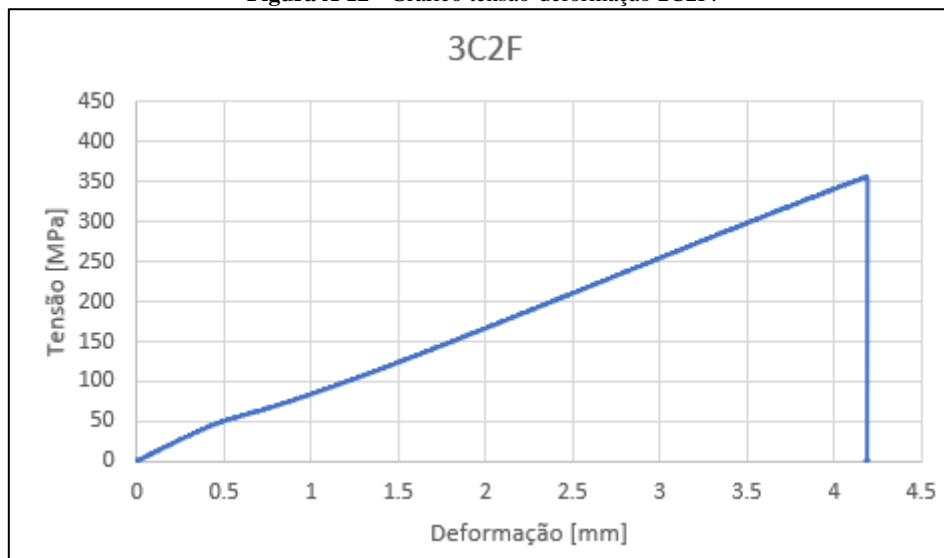


Figura A 13 - Gráfico tensão-deformação 3C2F.

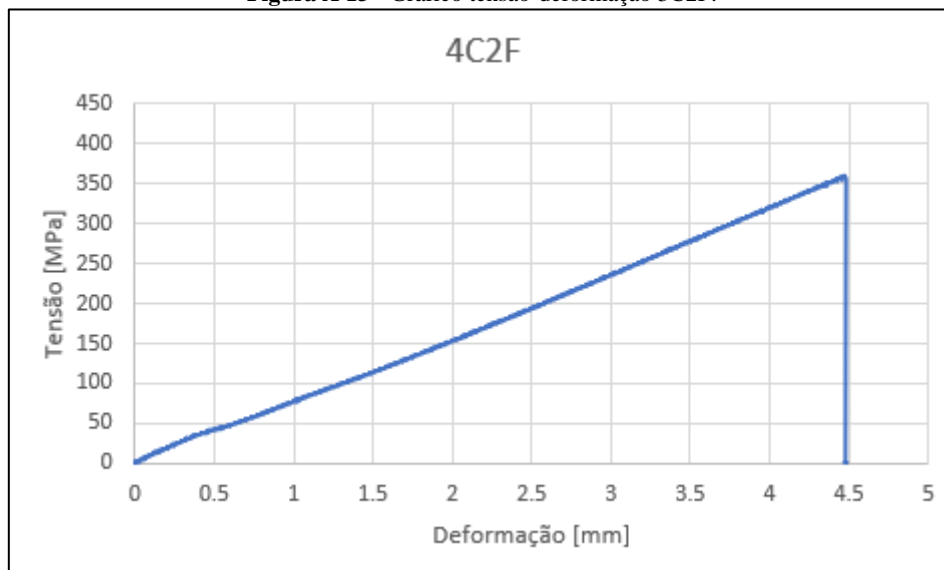


Figura A 14 - Gráfico tensão-deformação 4C2F.

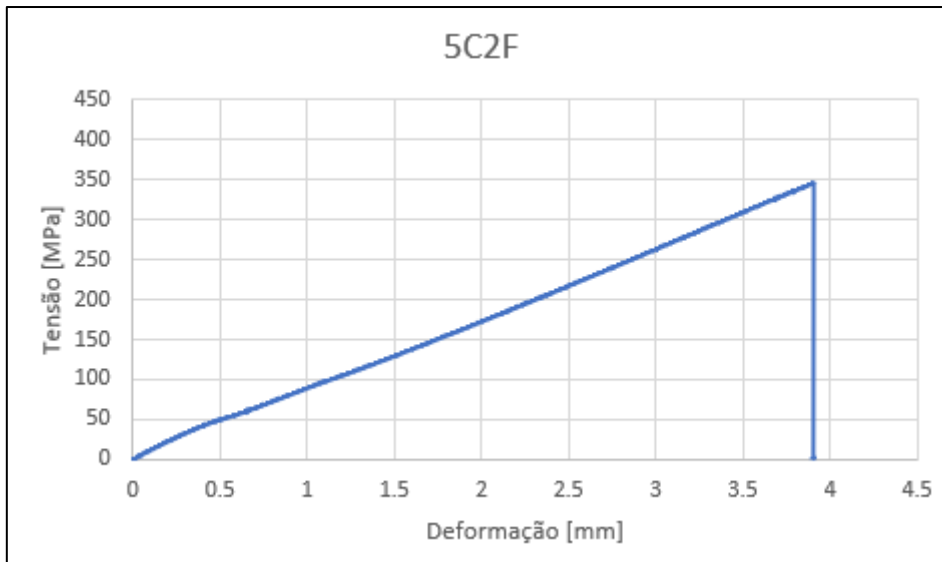


Figura A 15 – Gráfico tensão-deformação 5C2F.

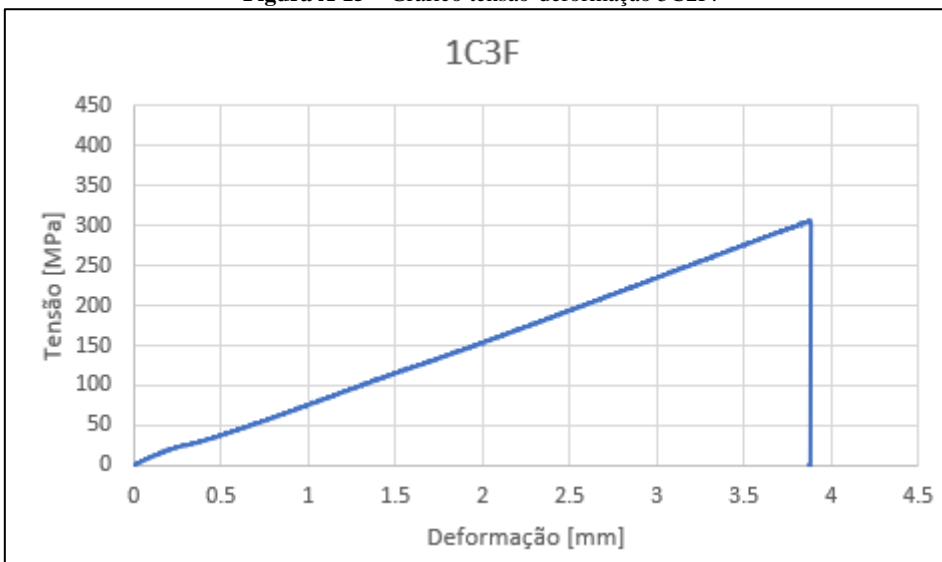


Figura A 16 - Gráfico tensão-deformação 1C3F.

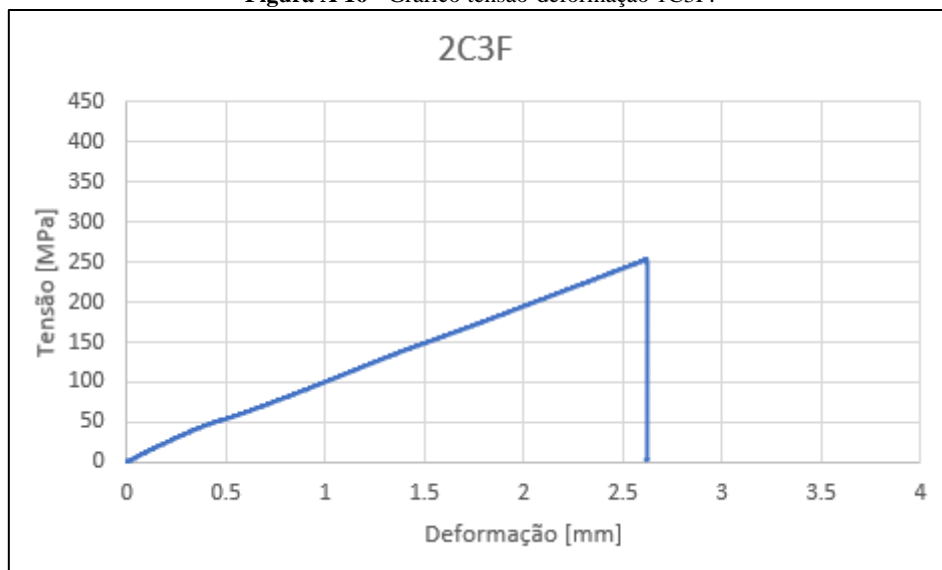


Figura A 17 - Gráfico tensão-deformação 2C3F.

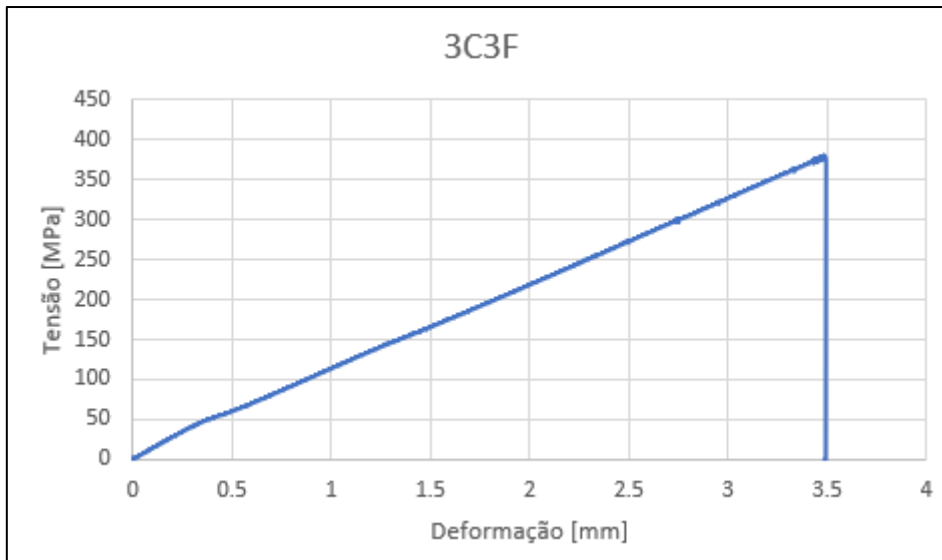


Figura A 18 - Gráfico tensão-deformação 3C3F.

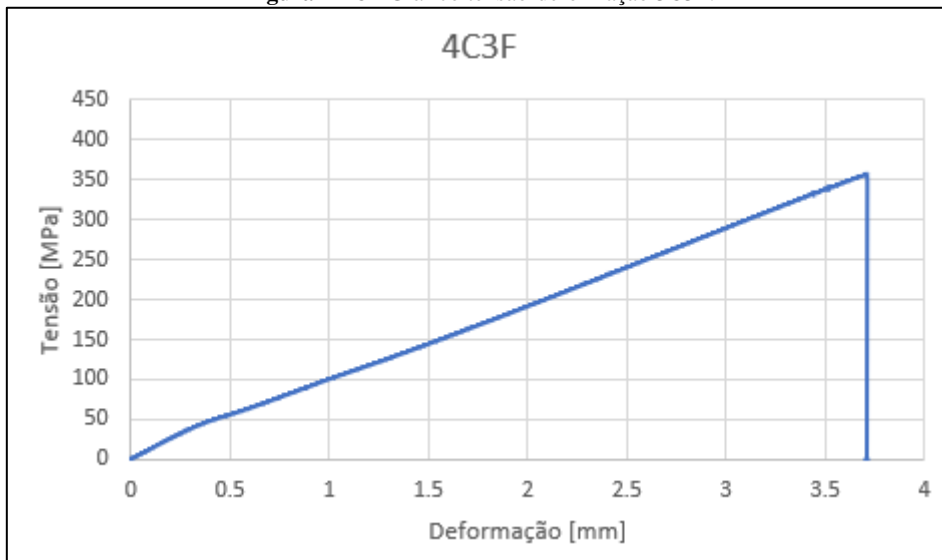


Figura A 19 - Gráfico tensão-deformação 4C3F.

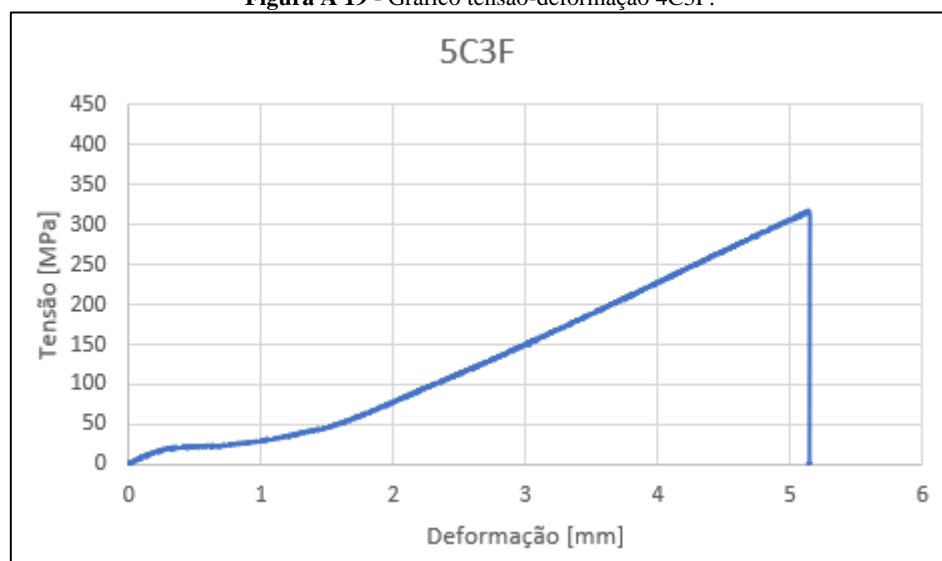


Figura A 20 - Gráfico tensão-deformação 5C3F.

ANEXO II

Este anexo tem como objetivo apresentar os gráficos, obtidos no Matlab, do progresso das propriedades de acordo com o número de iterações no método passo a passo da regra da mistura.

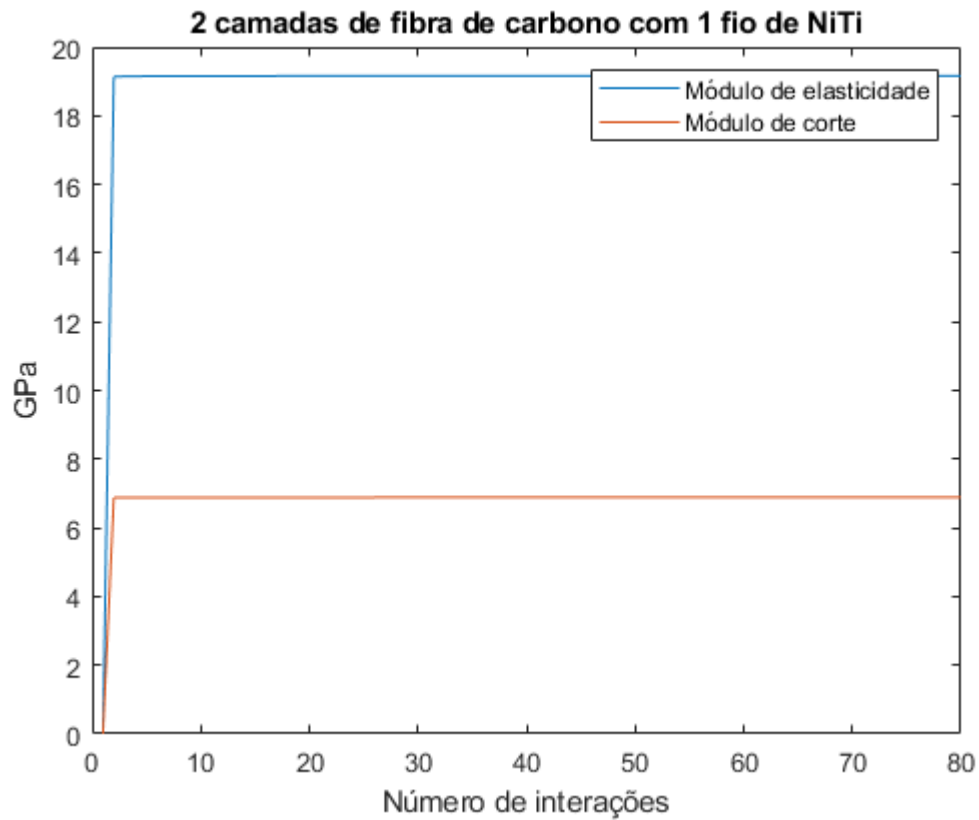


Figura A 21 - Gráfico da evolução módulo de elasticidade e o módulo de corte de acordo com o número de iterações para a configuração com 2 camadas de fibra de carbono e 1 fio de Nitinol.

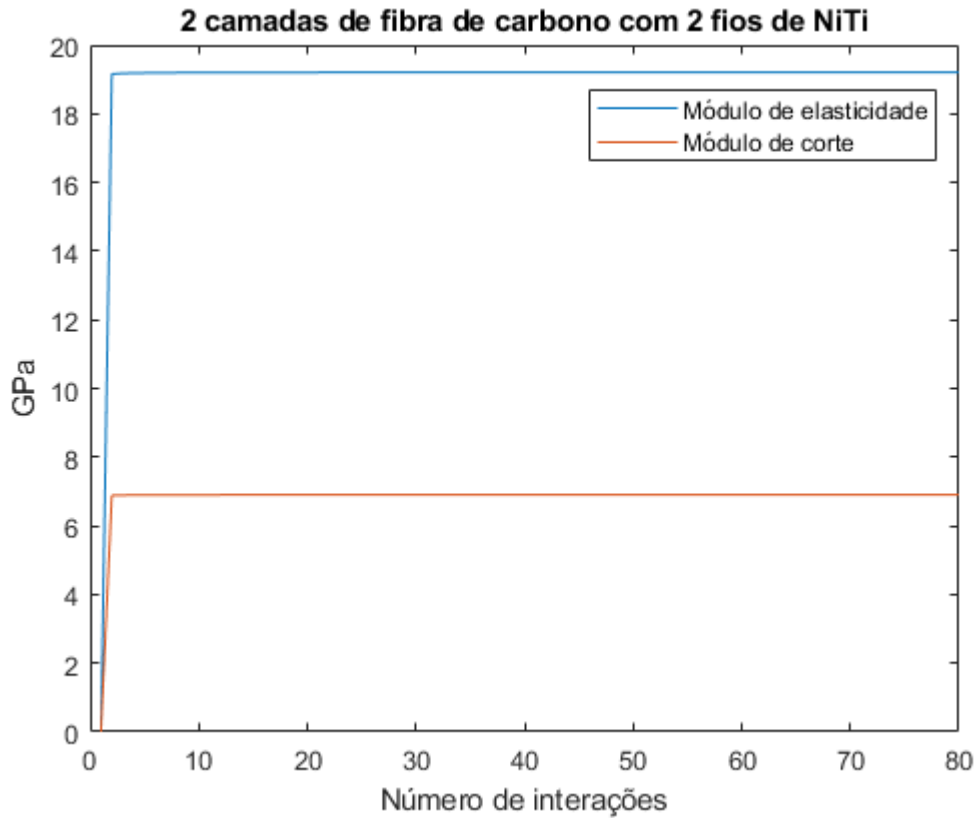


Figura A 22 - Gráfico da evolução módulo de elasticidade e o módulo de corte de acordo com o número de iterações para a configuração com 2 camadas de fibra de carbono e 2 fio de Nitinol.

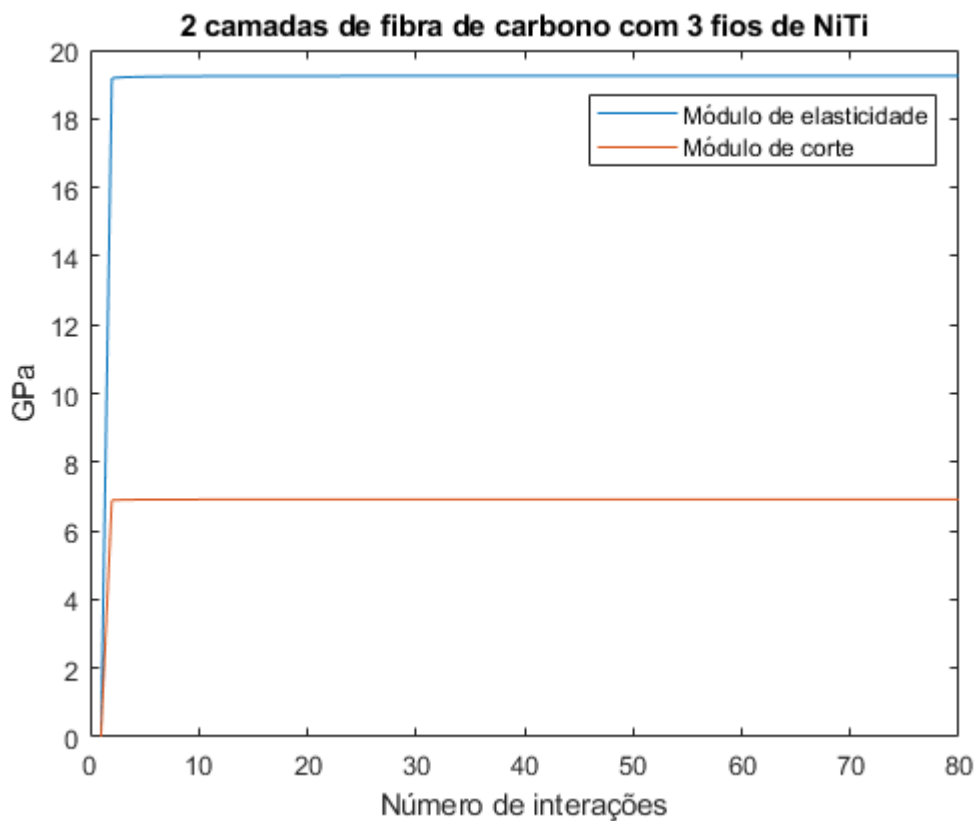


Figura A 23 - Gráfico da evolução módulo de elasticidade e o módulo de corte de acordo com o número de iterações para a configuração com 2 camadas de fibra de carbono e 3 fios de Nitinol.