

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Aeroespacial

**ANÁLISE NUMÉRICA E VALIDAÇÃO
EXPERIMENTAL DE COMPÓSITOS
NATURAIS, SINTÉTICOS E HÍBRIDOS
SUBMETIDOS A ENSAIOS DE TRAÇÃO**

Autora: Isabella Feitosa Policema
Orientadora: Prof^ª. PhD. Sandra Maria da Luz

Brasília, DF
2023



Isabella Feitosa Policema

ANÁLISE NUMÉRICA E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE COMPÓSITOS NATURAIS, SINTÉTICOS E HÍBRIDOS SUBMETIDOS A ENSAIOS DE TRAÇÃO

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof^ª. PhD. Sandra Maria da Luz

Brasília, DF

2023

Isabella Feitosa Policema

ANÁLISE NUMÉRICA E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE COMPÓSITOS NATURAIS, SINTÉTICOS E HÍBRIDOS SUBMETIDOS A ENSAIOS DE TRAÇÃO/ Isabella Feitosa Policema. – Brasília, DF, 2023-

74 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof^a. PhD. Sandra Maria da Luz

Trabalho de Conclusão de Curso –

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA , 2023.

1. Compósitos naturais e sintéticos e híbridos. 2. Ensaios de tração. I. Prof^a. PhD. Sandra Maria da Luz. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. ANÁLISE NUMÉRICA E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE COMPÓSITOS NATURAIS, SINTÉTICOS E HÍBRIDOS SUBMETIDOS A ENSAIOS DE TRAÇÃO

CDU 02:141:005.6

Isabella Feitosa Policema

ANÁLISE NUMÉRICA E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE COMPÓSITOS NATURAIS, SINTÉTICOS E HÍBRIDOS SUBMETIDOS A ENSAIOS DE TRAÇÃO

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 03 de fevereiro de 2023:

Prof^ª. PhD. Sandra Maria da Luz
Orientadora

Prof. PhD. Rodrigo Arbey Muñoz
Meneses
Convidado 1

Prof^ª. PhD. Rosineide Miranda Leão
Convidado 2

Brasília, DF
2023

Dedico este trabalho aos meus pais.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer a Deus por idealizar meu sonho na Engenharia Aeroespacial e nunca me deixar sozinha nessa jornada, sempre me incentivando e me dando oportunidade e confiança para continuar meu caminho nos estudos.

Aos meus pais, Isailde Feitosa e Arnaldo Policema, a quem desde os primeiros dias da minha vida deram todo o amor, carinho, compreensão, apoio financeiro e emocional possível, agradeço por tudo que fizeram e estão fazendo por mim.

Aos melhores amigos que a universidade me presenteou, Lorrhan Lisboa e Natália Régis, obrigada por não terem soltado a minha mão durante os momentos de tempestade da graduação, por todo carinho, incentivo e auxílio, que vocês dedicaram a mim durante esses anos, mesmo nos períodos onde não estive totalmente presente.

Agradeço aos meus amigos de laboratório, Celso Augusto e Linconl Araújo, por toda ajuda, apoio e paciência durante a confecção deste trabalho, o auxílio de vocês tornou essa jornada leve.

À minha orientadora, Prof^ª. Dr^ª. Sandra Maria da Luz, sou extremamente grata pela oportunidade de ter realizado este trabalho com a sua orientação, obrigada a todo conhecimento, atenção e paciência durante esses meses. Agradeço, também, a todos os professores da Faculdade do Gama que passaram pela minha formação, obrigada por todo conhecimento compartilhado com sabedoria.

Ao grupo de pesquisadores do Laboratório de Produtos Florestais do IBAMA, sobretudo ao analista Alexandre Gontijo, pelo auxílio na realização das análises microscópicas.

Por fim, não menos importante, a todos que de alguma forma fizeram parte da minha formação como graduanda e como ser humano, muito obrigada.

*"Se você está atravessando o inferno... não pare."
(Winston Churchill)*

Resumo

Os materiais compósitos reforçados com fibras são amplamente utilizados na fabricação de componentes estruturais de aeronaves, esses materiais são constituídos por fibras unidas por uma matriz, criando um material com propriedades mecânicas combinadas. Embora a fibra de vidro e a resina epóxi sejam os materiais mais comuns, o uso de fibras naturais tem se tornado uma opção mais sustentável. O estudo deste trabalho avaliou a utilização de diferentes tipos de fibras, incluindo as fibras sintéticas, as fibras naturais tratadas quimicamente em solução de hidróxido de sódio e uma combinação dessas fibras, como reforço para a resina epóxi. Para isso, foram confeccionados compósitos de resina epóxi com tecidos de fibras unidirecionais, contendo 20% em volume de fibras – sisal, vidro ou híbrido (sisal/vidro). Os materiais foram avaliados por meio de análises numéricas, térmicas e ensaios de tração experimentais, além de serem submetidos a microscopia eletrônica de varredura após a ocorrência de fratura. Em relação à fabricação, os resultados indicaram que os compósitos apresentaram variações de 1,30% a 4,65% em termos de fração de vazios. Quanto ao comportamento térmico, as curvas DSC, TG e DTG apontam que o compósito sintético curado deteve das maiores temperaturas de transição vítrea (94,86 °C) e de estabilidade térmica (308,41 °C). Enquanto, o compósito híbrido apresentou maior grau de cura (98,32%) e menor perda de massa ao final da análise (68,55%). As análises numéricas revelam divergências em relação aos resultados experimentais, pois o modelo não levou em conta a existência de espaços vazios e as propriedades específicas da resina epóxi de cura rápida e das fibras utilizadas. Contudo, experimentalmente, ao analisarmos as propriedades dos compósitos com relação à resina epóxi pura, observou-se um aumento quanto a resistência à tração, cerca de 36,59% para o compósito natural, 204,25% para o compósito sintético e 132,21% para o compósito híbrido. Quanto à microscopia das superfícies fraturadas, apesar de serem observados fenômenos de arrancamento e deslocamento de fibras, as amostras mostram que a adesão entre as fibras e a resina epóxi desempenha papel fundamental nas propriedades mecânicas finais dos compósitos. Apesar do aumento da resistência à tração obtido com a adição de fibras naturais à resina epóxi pura, os valores resultantes ainda estão distantes do necessário para substituir completamente as fibras sintéticas. Da mesma forma, embora os compósitos híbridos apresentem desempenho mecânico considerável, ainda não são uma solução viável para a substituição total de materiais sintéticos.

Palavras-chaves: Compósitos naturais e sintéticos e híbridos, Sisal, Fibra de vidro, Caracterização mecânica e numérica, Ensaios de tração.

Abstract

Fiber-reinforced composite materials are widely used in the manufacture of aircraft structural components, these materials consist of fibers joined by a matrix, creating a material with combined mechanical properties. Although fiberglass and epoxy resin are the most common materials, the use of natural fibers has become a more sustainable option. The study of this work evaluated the use of different types of fibers, including synthetic fibers, natural fibers chemically treated in sodium hydroxide solution, and a combination of these fibers, as reinforcement for epoxy resin. For this, epoxy resin composites were made with unidirectional fiber fabrics, containing 20% by volume of sisal, glass or hybrid (sisal/glass) fibers. The materials were evaluated by numerical and thermal analyses and experimental tensile tests, and were subjected to scanning electron microscopy after fracture occurrence. Regarding fabrication, the results indicated that the composites presented variations from 1,30% to 4,65% in terms of void fraction. As for the thermal behavior, the DSC, TG and DTG curves pointed out that the cured synthetic composite held of the highest glass transition temperatures (94,86 °C) and thermal stability (308,41 °C). Whereas, the hybrid composite showed higher degree of cure (98,32%) and lower mass loss at the end of the analysis (68,55%). The numerical analyses reveal divergence from the experimental results, because the model did not take into account the existence of voids and the specific properties of the fast curing epoxy resin and the fibers used. However, experimentally, when analyzing the properties of the composites in relation to the pure epoxy resin, an increase in tensile strength was observed, about 36,59% for the natural composite, 204,25% for the synthetic composite, and 132,21% for the hybrid composite. As for the microscopy of the fractured surfaces, although pull-out and fiber displacement phenomena are observed, the samples show that the adhesion between the fibers and the epoxy resin plays a key role in the final mechanical properties of the composites. Despite the increase in tensile strength obtained with the addition of natural fibers to pure epoxy resin, the resulting values are still far from what is needed to completely replace synthetic fibers. Similarly, although hybrid composites show considerable mechanical performance, they are not yet a viable solution for the total replacement of synthetic materials.

Key-words: Natural and synthetic and hybrids composites, Sisal, Glass fiber, Mechanical and numerical characterization, Tensile testing.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fases de um material compósito.	5
Figura 2 – Classificação de compósitos.	6
Figura 3 – Obtenção de laminados estruturais.	7
Figura 4 – Orientações para o empilhamento em compósitos laminados: (a) Uni-direcional. (b) Cruzados. (c) Multi-direcional.	8
Figura 5 – Aeronave Airbus A380 confeccionada com 25% do seu peso em compósitos reforçados com fibras.	8
Figura 6 – Estrutura da resina epóxi DGEBA.	11
Figura 7 – Reação química entre grupo epóxido e um endurecedor amina.	11
Figura 8 – Etapas até a cura completa do material: (a) Indução (difusão da epóxi com a amina). (b) Gelificação (estado de gel). (c) Vitrificação. (d) Cura total do material.	12
Figura 9 – Diagrama de transformação isotérmica de tempo e temperatura da resina epóxi.	13
Figura 10 – Materiais utilizados na fabricação do Boeing 787.	14
Figura 11 – Diferentes formas de fibras de vidro: (a) <i>Rovings</i> . (b) Tecidos de <i>rovings</i> . (c) Fios picados. (d) Mantas de fios picados.	16
Figura 12 – Estrutura celular da fibra natural.	17
Figura 13 – <i>Agave Sisalana</i> . (a) Planta. (b) Feixes de fibras de sisal.	18
Figura 14 – Diferentes formas de fibras de sisal. (a) Fio. (b) Cordão. (c) Tecido.	18
Figura 15 – Processo de fabricação manual de compósitos.	20
Figura 16 – Sistemas de coordenadas de um compósito laminado. (l) Eixo longitudinal; (t) Eixo transversal e (z) Direção fora do plano.	21
Figura 17 – Tensão aplicada no eixo longitudinal para ensaio de tração.	22
Figura 18 – Elementos sub-contínuos.	23
Figura 19 – Ilustração do processo do ensaio de tração.	25
Figura 20 – Geometrias normatizadas para os corpos de prova.	26
Figura 21 – Diagrama tensão-deformação.	27
Figura 22 – Fluxograma das metodologias utilizadas para a produção do trabalho.	30
Figura 23 – (a) Dimensões da geometria. (b) Superfície do corpo de prova. (c) Versão simplificada.	31
Figura 24 – Configuração das camadas do compósito sintético.	32
Figura 25 – Configuração das camadas do compósito natural.	32
Figura 26 – Configuração das camadas do compósito híbrido.	33
Figura 27 – (a) Condição de acoplamento com o ponto de referência. (b) Condições de engaste, movimento restrito e deslocamento.	33

Figura 28 – Malha gerada.	34
Figura 29 – Materiais utilizados para a confecção dos compósitos: (a) Fibras de sisal <i>in natura</i> . (b) Tecido unidirecional de fibras de vidros do tipo E. (c) Endurecedor HEX 135 FAST e resina epóxi HEX 135.	35
Figura 30 – Processo para obtenção das mantas de fibras naturais: (a) Tratamento químico com NaOH. (b) Enxágue pós tratamento. (c) Confecção dos tecidos unidirecionais.	36
Figura 31 – Esquemático da composição de camadas dos compósitos: (a) Compósito sintético. (b) Compósito natural. (c) Compósito híbrido.	37
Figura 32 – Etapas para a obtenção dos compósitos: (a) Banho ultrassônico da resina. (b) Processo manual. (c) Finalização com rolo compressor. (d) Cura por compressão.	38
Figura 33 – Analisador térmico da TAINstruments.	40
Figura 34 – Parâmetros extraídos das curvas DTG e TG.	41
Figura 35 – Temperatura de transição vítrea extraída das curvas DSC.	41
Figura 36 – (a) Máquina universal de testes da marca Instron. (b) Amostras de corpos de provas. (c) Corpo de prova sendo ensaiado.	42
Figura 37 – (a) Microscópio eletrônico de varredura. (b) Amostras das regiões fraturadas dos compósitos. (c) Análise.	43
Figura 38 – Análise microscópica da superfície das fibras de sisal: (a) <i>In natura</i> . (b) Tratada quimicamente em solução de hidróxido de sódio.	44
Figura 39 – Análise microscópica do compósito epóxi/sisal unidirecional: (c) Fibras sem tratamento. (e) Fibras tratadas em solução de hidróxido de sódio.	45
Figura 40 – Curvas TG e DTG para o compósito sintético	47
Figura 41 – Curvas TG e DTG para o compósito natural.	48
Figura 42 – Curvas TG e DTG para o compósito híbrido.	49
Figura 43 – Curvas TG e DTG para a resina epóxi pura.	50
Figura 44 – Curvas DSC: (a) Compósitos sintéticos. (b) Compósitos naturais. (c) Compósitos híbridos. (d) Resina epóxi pura.	51
Figura 45 – Curvas tensão-deformação dos diferentes compósitos.	55
Figura 46 – Análise microscópica da superfície fraturada do compósito sintético: (a) 100x. (b) 300x. (c) 300x.	56
Figura 47 – Análise microscópica da superfície fraturada do compósito natural: (a) 100x. (b) 100x. (c) 300x.	57
Figura 48 – Análise microscópica da superfície fraturada do compósito híbrido: (a) 100x. (b) 100x. (c) 300x. (d) 500x.	58
Figura 49 – Curva experimental tensão-deformação do: (a) Compósito sintético. (b) Compósito natural. (c) Compósito híbrido. (d) Epóxi pura.	61

Figura 50 – Fraturas para os compósitos: (a) Sintético. (b) Natural. (c) Híbrido. (d) Epóxi pura.	72
Figura 51 – Fraturas para os compósitos: (a) Sintético. (b) Natural. (c) Híbrido. (d) Epóxi pura.	74

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tipos de fibras de vidro existentes.	15
Tabela 2 – Propriedades específicas das fibras e da resina epóxi utilizadas.	28
Tabela 3 – Características da malha gerada.	34
Tabela 4 – Descrição de camadas de fibras e resina utilizadas na concepção dos corpos de prova.	39
Tabela 5 – Porcentagem de volume vazio nos compósitos e na placa de resina epóxi pura.	46
Tabela 6 – Resultados da análise termogravimétrica.	47
Tabela 7 – Resultados da análise de calorimetria exploratória diferencial.	52
Tabela 8 – Propriedades dos materiais sob tração.	53
Tabela 9 – Comparação dos resultados experimental e numérico para resistência à tração	59
Tabela 10 – Comparação dos resultados experimental e numérico para deformação	59

Lista de abreviaturas e siglas

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DGEBA	Diglicidil Éter do Bisfenol-A
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
EMBRAER	Empresa Brasileira de Aeronáutica
FAA	Administração Federal de Aviação
FML	<i>Fiber Metal Laminate</i>
FGA	Faculdade do Gama
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IYNF	Ano Internacional das Fibras Naturais
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
ONU	Organização das Nações Unidas
PMC	<i>Polymer Matrix Composite</i>
TGA	Análise Termogravimétrica
TTT	Diagrama de Transformação Isotérmica de Tempo e Temperatura
MEF	Método de Elementos Finitos
UnB	Universidade de Brasília

Lista de símbolos

T_{g0}	Temperatura anterior ao princípio da reação (resina em estado líquido)
$gelT_g$	Temperatura onde as etapas de gelificação e vitrificação coexistem
T_g	Temperatura de transição vítrea
α_{cura}	Grau de cura da amostra
T_{onset}	Temperatura de início do processo de degradação
T_{pico}	Temperatura de máxima degradação
T_{endset}	Temperatura do final do processo de degradação
T_{cura}	Temperatura de pico de cura
ΔH	Entalpia envolvida na reação
Fp_{matriz}	Fração em peso para a matriz
Fp_{fibras}	Fração em peso para as fibras
ρ_t	Densidade teórica
E	Módulo de elasticidade
ν	Coefficiente de Poisson
$\sigma(M)$	Matriz de tensão para materiais ortotrópicos
$\epsilon(M)$	Matriz de deformação para materiais ortotrópicos
$\Delta\epsilon_t$	Deformação transversal
$\Delta\epsilon_l$	Deformação longitudinal
L_0	Comprimento inicial da amostra
ΔL	Variação de comprimento da área útil da amostra
F_{ta}	Força de tração aplicada
S_0	Área transversal do corpo de prova
σ_z	Tensão normal na direção z (fora do plano)

σ_t	Tensão normal no eixo transversal
σ_l	Tensão normal no eixo longitudinal
τ_{tz}	Tensão de cisalhamento no plano tz
τ_{lz}	Tensão de cisalhamento no plano lz
τ_{lt}	Tensão de cisalhamento no plano lt
E_1	Módulo de elasticidade longitudinal
E_2	Módulo de elasticidade transversal
ν_{12}	Coefficiente de Poisson no plano principal
G_{12}	Módulo de cisalhamento no plano
G_{23} e G_{13}	Módulos de cisalhamento fora do plano
F_{1l}	Resistência à tração longitudinal
F_{1c}	Resistência à compressão longitudinal
F_{2t}	Resistência à tração transversal
F_{2c}	Resistência à compressão transversal
F_{23}	Resistência ao cisalhamento transversal
V_{fr}	Frações de vazios
ρ_r	Densidade real
V_r	Volume real da amostra
m_r	Massa da amostra

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivo Geral	3
1.4	Objetivos Específicos	3
1.5	Estruturação do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Materiais Compósitos	5
2.1.1	Compósitos Reforçados com Fibras	6
2.1.1.1	Compósitos Híbridos	9
2.1.2	Matrizes Termoplásticas e Termofixas	9
2.1.2.1	Resina Epóxi DGEBA e Agente de Cura	10
2.1.3	Fibras Sintéticas e Naturais	13
2.1.3.1	Fibras de Vidro	14
2.1.3.2	Fibras de Sisal	16
2.1.4	Adesão Fibra-Matriz	19
2.2	Processo de Fabricação Manual (<i>Hand Lay-up</i>)	20
2.3	Mecânica dos Compósitos Laminados Unidirecionais	21
2.4	Método de Elementos Finitos	23
2.5	Caracterização dos Materiais	24
2.5.1	Ensaio de Tração (ASTM D3039)	24
2.5.2	Análise Térmica	28
2.5.3	Espaços Vazios	29
3	METODOLOGIA	30
3.1	Modelagem e Análise Numérica via MEF	30
3.1.1	Geometria e Propriedades dos Materiais	31
3.1.2	Esforços e Condições de Contorno	33
3.1.3	Escolha da Malha	34
3.2	Processo de Laminação Manual	35
3.2.1	Materiais e Métodos	35
3.2.2	Preparação das Fibras Naturais	36
3.2.3	Preparação dos Corpos de Prova	37
3.3	Cálculo de Vazios	39
3.4	Análise das Propriedades Térmicas	40

3.5	Ensaio de Tração	42
3.6	Análise da Fratura	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	Qualidade Final dos Compósitos obtidos por Laminação Manual . .	44
4.1.1	Tratamento Químico das Fibras Naturais	44
4.1.2	Análise de Vazios	46
4.2	Caracterização dos Materiais por Análise Térmica	46
4.2.1	Termogravimetria (TGA)	47
4.2.2	Caracterização por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	51
4.3	Resistência às Tração e Análise da Fratura	53
4.4	Resultados da Análise Numérica e Comparações	59
5	CONCLUSÃO	63
5.0.1	Sugestão de Trabalhos Futuros	64
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICE A – ENSAIO EXPERIMENTAL	71
A.1	Cálculo de Massa por Manta	71
A.2	Fratura	72
	APÊNDICE B – ANÁLISE NUMÉRICA	73
B.1	Propriedades Específicas dos Materiais	73
B.2	Fratura	74

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo é dedicado a uma breve apresentação do contexto no qual o trabalho se insere e as justificativas para a realização do estudo.

1.1 Contextualização

Materiais compósitos são aqueles que consistem em uma combinação entre dois ou mais componentes, onde cada um deles possuem suas próprias características. O objetivo da utilização destes materiais é obter uma combinação de propriedades que não são encontradas individualmente. Eles são amplamente utilizados em uma variedade de aplicações, como, aeronáutica, aeroespacial, automobilística, naval, construção civil e bioengenharia (NETO; PARDINI, 2016). A primeira vez que um material compósito foi utilizado em uma aeronave foi na década de 1940, com o uso da fibra de vidro para reforçar as estruturas das asas e da fuselagem de um bombardeiro. Hoje em dia, os materiais compósitos são amplamente utilizados em todas as aeronaves, incluindo caças, planadores, aviões comerciais e jatos executivos (BATISTA, 2018).

Os compósitos podem ser reforçados com fibras e ou partículas. Os compósitos reforçados com fibras são aqueles em que as fibras são distribuídas de forma orientada ao longo do material, enquanto os reforçados com partículas são aqueles onde as partículas estão distribuídas de maneira aleatória. Quando se trata de compósitos reforçados com fibras, amplamente utilizados na indústria aeronáutica, as fibras mais comumente utilizadas são sintéticas, como as fibras de vidro, as fibras de carbono e as fibras de aramida. As fibras apresentam alta resistência (250 MPa - 4.826 MPa) e rigidez, além de serem resistentes à corrosão, a altas temperaturas e ao desgaste. Entretanto, há alguns fatores negativos associados, tais como o alto custo de fabricação e processamento, além da poluição gerada por esses processos e pelo seu descarte (BOUVET, 2017).

Devido a esses fatores negativos, há uma necessidade crescente do setor industrial em substituir o uso dos materiais sintéticos – que detêm de uma produção associada a emissão de CO_2 e elevado consumo de energia – por fontes renováveis, uma vez que estas apresentam menor custo, menor emissão de poluentes e menor consumo de energia para sua produção, como as fibras vegetais ou lignocelulósicas. Dentre as fibras lignocelulósicas decorrentes da extração de plantas, a fibra de sisal vem sendo analisada para diferentes aplicações, todavia esse tipo de reforço ainda é limitado por conta de seu baixo desempenho mecânico (60 MPa), sua alta capacidade de absorção de umidade e sua influência pelo ambiente externo, intempéries e regiões de plantio, por exemplo (SILVA, 2014).

Outra opção é a fabricação de compósitos híbridos contendo fibras sintéticas e naturais, essa combinação é uma alternativa que permite aproveitar as melhores características de ambas as fibras, diminuindo o impacto ambiental e os custos finais. Essa junção pode resultar em uma menor capacidade de absorção de água pelas fibras naturais, aumentando sua resistência mecânica e entregando melhores propriedades finais ao compósito híbrido. Além disso, a oportunidade de um equilíbrio entre garantir a sustentabilidade e obter um material rígido e resistente o suficiente para determinada aplicação, é uma abertura para uma futura substituição dos materiais totalmente sintéticos na indústria aeronáutica (ROMANZINI, 2014).

Contudo, a fabricação em geral, desses materiais compósitos reforçados com fibras, trata-se de um processo de alto custo, uma vez que detêm de fibras onerosas e processos complexos que requerem habilidade e precisão. Uma solução no meio acadêmico para reduzir os custos de fabricação desses materiais é realizar análises numéricas com MEF (Métodos dos Elementos Finitos), isso permite simular o comportamento dos compósitos sem que haja o acréscimo do custo para a confecção de protótipos (BARBERO, 2013).

Diante disso, o tema proposto para este trabalho envolve a concepção e a análise de três diferentes compósitos de resina epóxi utilizando como reforço fibras de vidro, fibras de sisal e a combinação de fibras sintéticas e naturais, com a finalidade de avaliar a possibilidade substituição dos materiais sintéticos em aplicações de alto desempenho. Para isso, propõe-se a realização de análises térmica, numérica e validação dos resultados por meio de ensaios experimentais, visando a compreensão do comportamento desses materiais sob as ações de temperatura e de sua resposta a carregamentos unidirecionais.

1.2 Justificativa

Desde 1960, o uso de fibras sintéticas em materiais compósitos tem aumentado significativamente, resultando em menor utilização das fibras naturais. Apesar do crescimento de 13% no uso de fibras naturais na fabricação de compósitos desde o Ano Internacional das Fibras Naturais (IYNF) promovido pela ONU em 2009, ainda há uma necessidade de mais pesquisas para desenvolver materiais naturais ou híbridos visando aplicações mais sustentáveis, especialmente em áreas que requerem alto desempenho, como componentes estruturais da aeronáutica (CHONG; LAW; CHAN, 2021). Dessa forma, é crucial a realização de estudos que busquem a preservação ambiental e o desenvolvimento de materiais baseados em matérias-primas renováveis ou com menor emissão de CO_2 durante sua produção.

A justificativa para o tema proposto é baseada nesta necessidade de desenvolver materiais mais sustentáveis e de menor impacto ambiental para a fabricação de componentes estruturais da aeronáutica. Embora as fibras sintéticas de alto desempenho ainda

sejam amplamente utilizadas, a aplicação de fibras naturais em algumas partes estruturais das aeronaves, como revestimentos interiores e painéis de piso, tem sido estudada como uma alternativa mais sustentável e de menor impacto ambiental (BLEDZKI; GASSAN, 2019). Portanto, o presente trabalho tem grande relevância e contribuirá para o avanço da pesquisa e desenvolvimento de materiais envolvendo fibras naturais na indústria aeronáutica.

1.3 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é simular, fabricar e caracterizar compósitos poliméricos unidirecionais de matriz epóxi reforçados com 20% do volume total em fibras de vidro ou sisal, além da combinação destas, a fim de avaliar a possibilidade de substituição de materiais compósitos totalmente sintéticos por materiais naturais ou híbridos.

1.4 Objetivos Específicos

- Realizar análises numéricas dos diferentes compósitos submetidos a ensaios de tração.
- Confeccionar compósitos de resina epóxi reforçados com 20% do volume em fibras naturais, fibras sintéticas e pela combinação dessas.
- Realizar análises térmicas para avaliar o comportamento térmico das amostras.
- Estudar o comportamento mecânico e caracterizar os compósitos submetidos ao ensaio de tração.
- Realizar análise morfológica das superfícies fraturadas.
- Validar os resultados numéricos por meio de análises experimentais.
- Comparar as propriedades mecânicas dos diferentes compósitos.

1.5 Estruturação do Trabalho

Este trabalho está dividido em 5 seções. A primeira seção descreve o objetivo, o contexto e a justificativa do tema abordado. A segunda parte apresenta uma revisão da literatura sobre materiais compósitos, com ênfase nos tipos de matrizes e reforços utilizados, bem como nos métodos de fabricação e caracterização mecânica e térmica. A terceira seção descreve as metodologias utilizadas para tratar as fibras naturais e caracterizar os compósitos nos ensaios térmicos, experimentais e numéricos. A quarta seção apresenta e

discute os resultados obtidos. E por fim, a quinta seção apresenta uma conclusão sobre a comparação do desempenho mecânico dos materiais estudados e considerações adicionais que poderiam ser incluídas em trabalhos futuros.

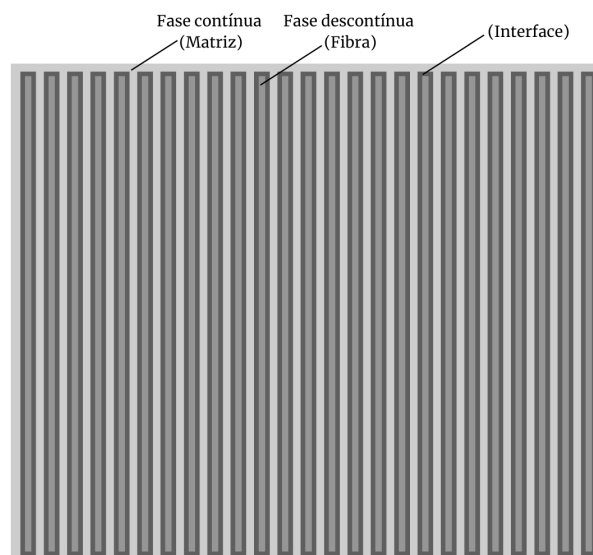
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os principais conteúdos, materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da análise mecânica comparativa, sendo eles: Materiais compósitos, adesão fibra-matriz, processo de fabricação manual, caracterização de compósitos e metodologia de elementos finitos.

2.1 Materiais Compósitos

Materiais compósitos, em escala macroscópica, são constituídos da junção de dois ou mais materiais com propriedades, ou fases distintas. Normalmente uma fase contínua e uma descontínua, onde cada uma das quais contribui para as propriedades finais do material (LI; SU, 2020) (LOPES, 2017). A fase contínua é nomeada como matriz, por apresentar menor resistência e rigidez para o conjunto, enquanto a fase descontínua é conhecida como reforço e apresenta maior resistência e rigidez para o compósito. A interação entre a fibra e a matriz, é conhecida como interface, responsável pela adesão entre os diferentes materiais integrantes, conforme ilustrado na Figura 1 (NETO; PARDINI, 2016).

Figura 1 – Fases de um material compósito.

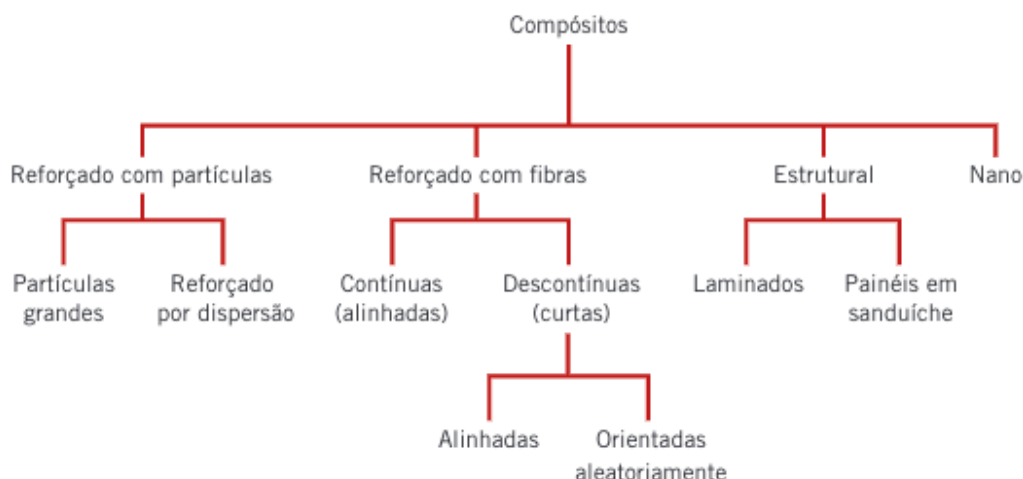


Fonte: Adaptado de (DANIEL; ISHAI, 2006).

A classificação desses compósitos, segundo (CALLISTER; RETHWISCH, 2016), envolve quatro principais segmentos, relacionados quanto ao tipo de reforço utilizado

e quanto ao seu modo de disposição, sendo eles, compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras, compósitos estruturais e nanocompósitos (Figura 2). Os compósitos reforçados com fibras estão entre os mais usualmente utilizados na indústria para aplicações que requerem altas resistências mecânicas e baixo peso.

Figura 2 – Classificação de compósitos.



Fonte: (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

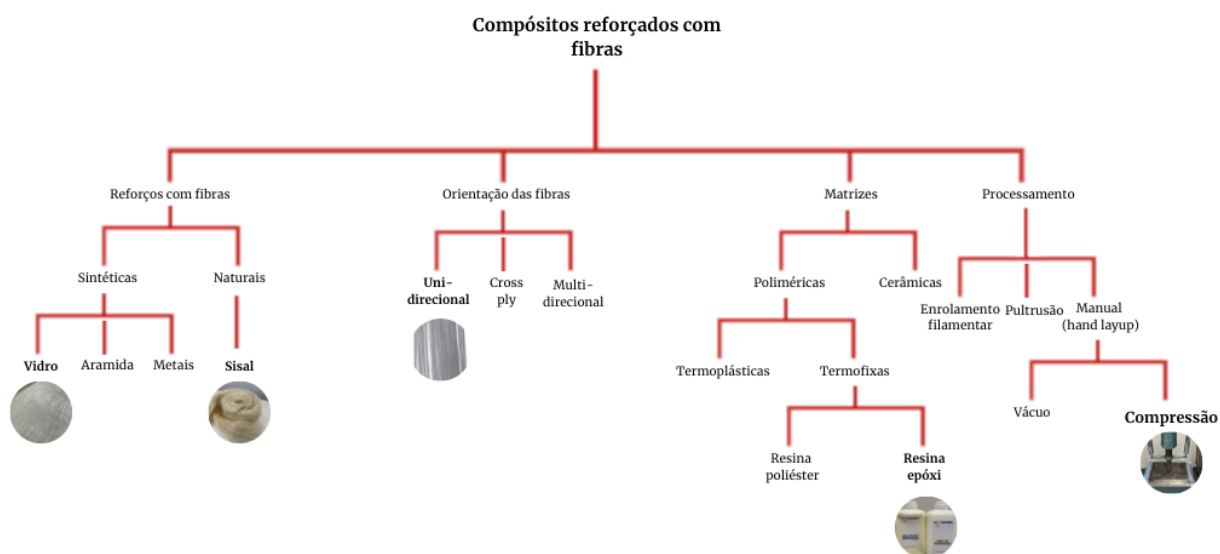
Esses materiais passaram a ser aplicados efetivamente na indústria aeronáutica durante a década de 40, já atualmente apresentam um papel fundamental no desenvolvimento de projetos de aeronaves. Além do baixo peso e de não estarem sujeitos à corrosão, as vantagens que esses componentes entregam às estruturas de um avião abrangem a possibilidade de formulação de projetos que envolvem estruturas curvas com design suave, baixa resistência aerodinâmica e alto desempenho sob flexão. Nesse âmbito, dentre os materiais mais utilizados estão as fibras de vidro e de carbono como reforço, e a resina epóxi DGEBA (Diglicidil Éter do Bisfenol-A) como matriz (RÊGO; SANTOS; MARINHO, 2020).

2.1.1 Compósitos Reforçados com Fibras

Os compósitos reforçados com fibras estão inseridos de maneira efetiva na indústria aeronáutica e aeroespacial, devido à flexibilidade de dimensioná-los para atender requisitos específicos que entreguem desempenho em voo de aeronaves e veículos espaciais. Baseado no desenvolvimento das fibras utilizadas como reforço, atualmente empresas fornecedoras de pré-impregnados (reforços impregnados com resina no estágio B de cura) para a obtenção desses compósitos, subsidiam em alta escala para empresas como Airbus, Boeing, Bombardier e EMBRAER (GOMES, 2020).

Esses materiais são obtidos a partir da disposição de finas camadas de fibras e matriz, até o alcance da espessura desejada (MALLICK, 2007). As características resultantes não dependem apenas das propriedades dos materiais integrantes, mas dependem conjuntamente das frações volumétricas e do projeto geométrico dos constituintes (Figura 3). Portanto, a orientação da fibra e a sequência das camadas, são alguns dos diversos parâmetros determinantes nas propriedades físicas e mecânicas desses materiais (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Figura 3 – Obtenção de laminados estruturais.



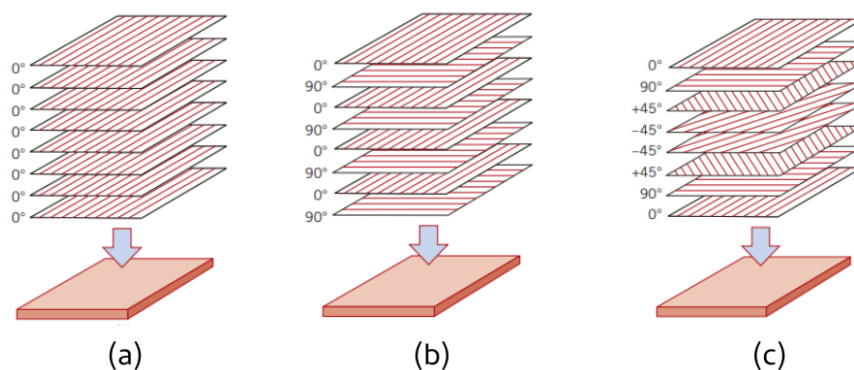
Fonte: Adaptado de (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

O tipo de fibra utilizado como reforço em compósitos influencia consideravelmente em seu desempenho mecânico. Atualmente, a indústria aeronáutica faz o uso de fibras sintéticas integradas em matrizes poliméricas ou metálicas, apesar do comportamento estrutural de compósitos reforçados com fibras sintéticas ser superior ao das fibras naturais, os impactos ao ecossistema gerados para a produção e para o descarte desses materiais alertam para a necessidade de substituição por recursos renováveis e recicláveis (NETO; PARDINI, 2016).

Além disso, o reforço utilizado deve apresentar comprimento suficiente para suportar a carga que será transmitida pela matriz, sem acumular material no volume total do compósito. Quanto à orientação das mantas, as fibras podem ser dispostas de diferentes maneiras, sendo elas, em uma única direção (unidirecional), Figura 4 (a), apresentando maiores propriedades mecânicas quanto à tração, em duas direções diferentes combinadas (cruzados e camadas em ângulos), Figura 4 (b), ou intercaladas em diversas direções (multi-direcional), Figura 4 (c) (BATISTA, 2022). Diante disso, visando adquirir o melhor desempenho mecânico desses materiais submetidos aos esforços de tração, o objeto

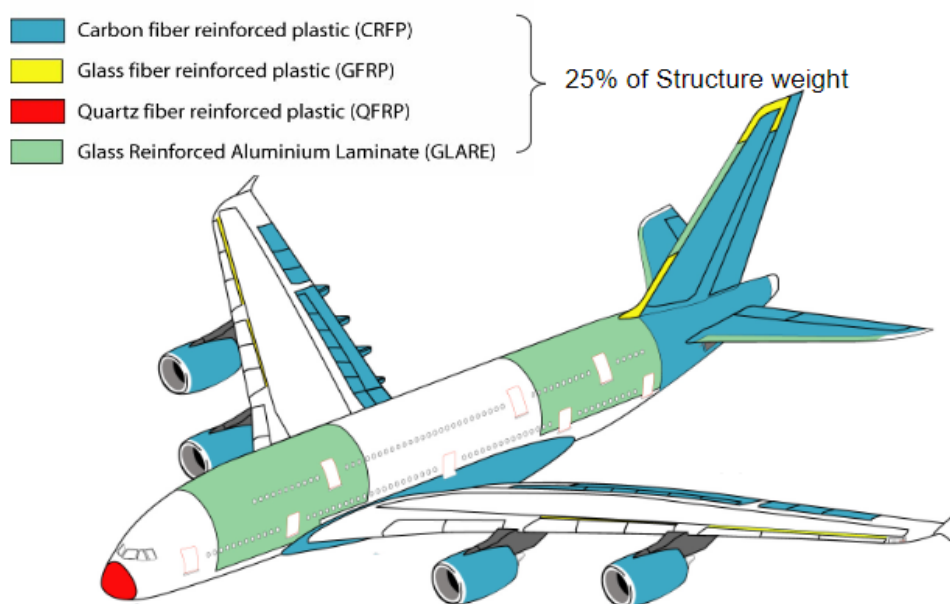
de estudo do presente trabalho envolve a configuração de fibras longas dispostas unidirecionalmente.

Figura 4 – Orientações para o empilhamento em compósitos laminados: (a) Unidirecional. (b) Cruzados. (c) Multi-direcional.



Fonte: Adaptado de (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Figura 5 – Aeronave Airbus A380 confeccionada com 25% do seu peso em compósitos reforçados com fibras.



Fonte: (SOUZA et al., 2018).

Para o processamento desses compósitos, os principais métodos da indústria envolvem, enrolamento filamentar e pultrusão. Ambos os processos são automatizados e abrangem fibras contínuas de reforço impregnadas com resina, o primeiro método consiste em enrolar fibras resinadas em volta de um mandril automatizado – com diferentes padrões de enrolamento – onde após a cura do material em um forno ou à temperatura

ambiente, o mandril é retirado. Já no processamento por pultrusão, as fibras contínuas são puxadas por um molde de aço formando componentes de seção transversal constante, como barras, tubos e vigas. Todavia, além desses procedimentos automatizados, técnicas manuais (*hand lay-up*) têm sido cada vez mais difundidas, visto que são mais simples e tão eficientes quanto os demais métodos, esse processamento costuma ser sucedido de uma moldagem por compressão ou vácuo (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

2.1.1.1 Compósitos Híbridos

Dentre o que existe de novo na produção dos compósitos reforçados com fibras, os compósitos híbridos têm se difundido e destacado nesse âmbito, esses materiais são obtidos com uma matriz e dois ou mais tipos de fibras diferentes, apresentando melhores combinações de propriedades mecânicas, se forem comparados aos materiais constituídos com um tipo de fibra (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). As combinações mais comuns envolvem diferentes fibras – normalmente fibras de carbono e fibras de vidro, por compensarem a relação de rigidez, peso e custo – em uma matriz polimérica ou metálica, *Fiber Metal Laminate* (FML).

Em 1978, foram produzidos os primeiros compósitos híbridos com laminados metal-fibras, desenvolvidos para aplicações aeronáuticas nos estudos de Jaap Shijve e Boud Vogelesang. Essa pesquisa foi fundamentada em simulações de voos de aviões construídos com laminados de fibras de carbono e aramida em uma matriz metálica, o resultado desses estudos permitiu a estruturação de um material de baixo peso, resistente à fadiga, à corrosão e ao fogo, além de ter as propriedades das estruturas metálicas preservadas (JÚNIOR; PARDINI; ANCELOTTI, 2020).

A associação entre fibras naturais e sintéticas em um compósito híbrido é uma das alternativas para uma futura substituição dos materiais totalmente sintéticos, uma vez que a busca por maior resguardo ao meio ambiente colocou em pauta o uso de materiais renováveis. Apesar de seu crescente potencial em aplicações de carregamentos moderados, as fibras naturais apresentam baixo desempenho mecânico e alta absorção de umidade, a hibridização seria uma solução para o uso dessas fibras e resultaria em um compósito com menor impacto ao ecossistema e melhores propriedades mecânicas (SILVA et al., 2008).

2.1.2 Matrizes Termoplásticas e Termofixas

As matrizes dos compósitos são responsáveis por manter as fibras juntas e suportar tensões transversais, apresentando resistência à compressão, resistência ao cisalhamento intralaminar (estruturas sob flexão) e resistência ao cisalhamento no plano (estruturas sob torção). Características que envolvem a aparência e as condições de serviço dos compósitos, como faixa de temperatura para operação, resistência química e à abrasão, também são determinadas pela matriz. Ademais, é o constituinte responsável por transferir as ten-

sões para as fibras e proteger o material contra produtos químicos, umidade e degradação mecânica (AZEVEDO, 2021)(MALLICK, 2007).

Os materiais usualmente empregados para esse intuito são polímeros, metais ou cerâmicas (LOPES, 2017). Atualmente, por conta do baixo custo e da simplicidade do processo de fabricação, as matrizes mais utilizadas pelas indústrias são as matrizes poliméricas, classificadas conforme o tipo de polímero, sendo eles, polímeros termoplásticos e termofixos. Enquanto, as matrizes metálicas e cerâmicas são utilizadas para aplicações em altas temperaturas (BENEDETTO, 2019).

Matrizes poliméricas termoplásticas apresentam temperaturas de aplicações limitadas, uma vez que amolecem por aquecimento à temperatura de transição vítrea (T_g), no entanto, podem ser facilmente processadas e remodeladas com calor e pressão, permitindo maior tenacidade e baixo custo para grandes volumes de fabricação de compósitos. Entretanto, esses polímeros são higrotérmicos e por isso absorvem calor e umidade do ambiente, resultando no inchaço do material e na redução de sua temperatura de transição vítrea, assim produzindo severas tensões internas (NETO, 2020).

Enquanto matrizes poliméricas termofixas apresentam uma estrutura de rede tridimensional insolúvel e infusível, que se encontra ligada covalentemente. Portanto, essas matrizes são moldadas durante a etapa de fabricação ou mantidas em baixas temperaturas no estágio B de cura para posterior moldagem, uma vez que não amolecem por aquecimento após finalizado o ciclo de cura. Além de apresentarem menor resistência ao calor, essas matrizes também denotam as mesmas desvantagens potenciais das matrizes termoplásticas, logo, apresentam faixas de temperatura de aplicação limitantes, são passíveis à degradação por umidade ou radiação e possuem baixas resistências transversais (BENEDETTO, 2019).

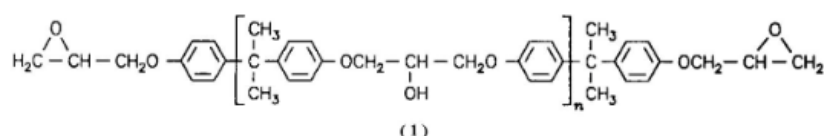
As matrizes termofixas mais comuns são poliamidas, poliésteres e epóxis. As primeiras apresentam mais dificuldade em seu processo de fabricação, por conta das altas faixas de temperatura para aplicações (cerca de 300 °C). Os poliésteres (insaturados) são comumente utilizados para aplicações que não requerem alto desempenho, uma vez que são pouco resistentes às exposições externas e operam em temperaturas de até 100 °C. Enquanto, matrizes epóxis envolvem aplicações de alto desempenho, dado que detêm de um menor encolhimento durante o processo de cura, apresentam boa resistência à umidade e à altas temperaturas (superior a 175 °C). Também possuem boas propriedades mecânicas, envolvendo alta dureza e alta estabilidade térmica, além de serem eficientes quanto a adesão matriz-fibra (LOPES, 2018).

2.1.2.1 Resina Epóxi DGEBA e Agente de Cura

As resinas epóxis foram descobertas em meados da década de 40, são atualmente utilizadas em aplicações estruturais de alto desempenho. Formadas pela reação de conden-

sação entre a Epicloridrina e o Bisfenol-A, a resina diglicidil éter do bisfenol-A (DGEBA), além de apresentar boa adesão, baixo encolhimento durante a cura e maior versatilidade, também possui fácil manuseio para seu processamento. Inicialmente em estado líquido, essa resina institui-se em uma matriz termofixa sólida por meio da reação de cura, realizada pela ação dos agentes de cura – conhecidos como endurecedores – (em uma proporção específica) na estrutura primária da DGEBA, ilustrada na [Figura 6](#) ([SILVA, 2020](#)).

Figura 6 – Estrutura da resina epóxi DGEBA.

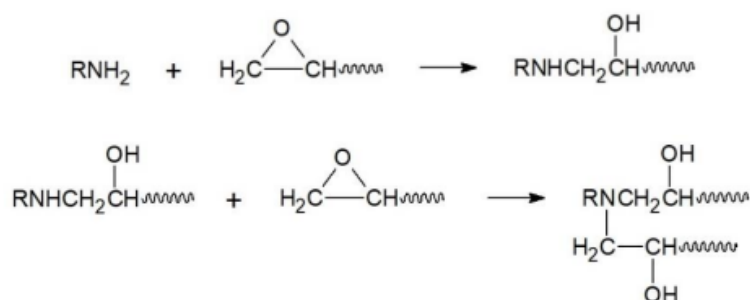


Fonte: ([JUNIOR, 2019](#)).

A estrutura da resina DGEBA é composta por grupos epóxidos (anéis oxirano), encontrados em suas extremidades, formados pelo conjunto de um oxigênio ligado a dois átomos de carbonos unidos entre si, e a unidade de repetição no meio da estrutura (n), objeto responsável pela variação da relação molar de epicloridrina e bisfenol-A. Essa relação costuma variar de 10:1 a 1,2:1, onde diferentes consistências são adquiridas, produzindo resinas desde o estado líquido ao estado sólido, ainda como pré-polímero. Para resinas líquidas de baixa viscosidade a unidade de repetição varia dentro do intervalo de ($0 < n < 1$), enquanto para resinas sólidas ($n > 1$) ([LIMA; ASSUMPTÃO, 2019](#)).

Para o processamento e o controle da cura desses materiais, os endurecedores, com sua alta capacidade de formação de redes tridimensionais, reagem com os grupos epóxidos, formando e consolidando as ligações cruzadas na estrutura, conforme ilustrado na [Figura 7](#). Além disso, também são os agentes determinantes na cinética de cura e na temperatura de transição vítrea (T_g) da resina. A natureza básica desses agentes de cura é do tipo amina, subdividida em segmentos como aminas aromáticas, alifáticas ou cicloalifáticas ([JUNIOR, 2019](#)).

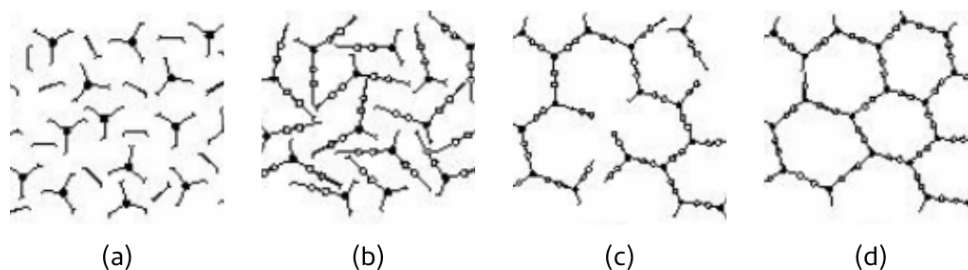
Figura 7 – Reação química entre grupo epóxico e um endurecedor amina.



Fonte: ([JUNIOR, 2019](#)).

Essa reação de cura é determinante nas propriedades mecânicas finais dos compósitos com resina epóxi, a cura completa do material é realizada em três diferentes etapas, conforme a [Figura 8](#), estágios de indução, gelificação e vitrificação, onde os dois últimos processos indicam o comportamento viscoelástico desse tipo de resina. O primeiro estágio envolve a indução – composta pela difusão das moléculas da resina epóxi e do endurecedor amina, ambos em estado líquido – [Figura 8](#) (a). A segunda etapa, conhecida como estágio de gelificação (governada pela cinética de Arrhenius)– representa a transição do estado líquido para o estado gel (borracha), onde as propriedades elásticas surgem e a viscosidade, antes constante, começa a crescer exponencialmente, enquanto as ligações cruzadas se formam em pontos espaçados, iniciando uma rede reticulada insolúvel – [Figura 8](#) (b). Por fim, a etapa de vitrificação – trata-se da transição do material em um estado líquido ou em ponto gel para um estado vítreo, onde as reações químicas encerram, formando um material de estrutura rígida com a reticulação de todas as suas cadeias – [Figura 8](#) (c).

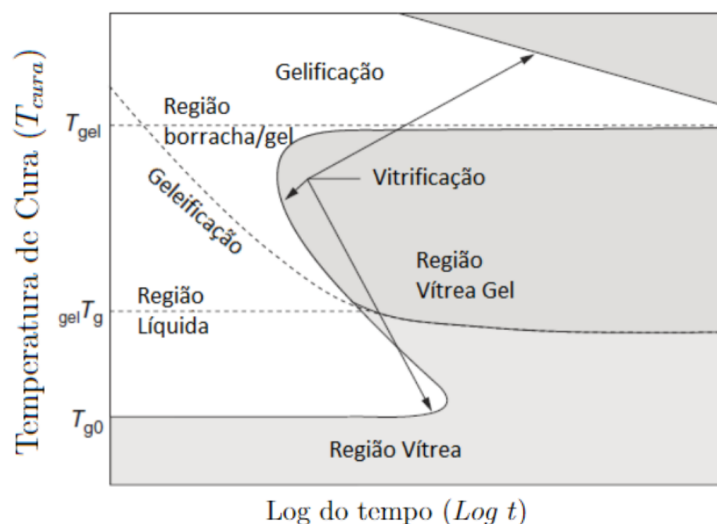
Figura 8 – Etapas até a cura completa do material: (a) Indução (difusão da epóxi com a amina). (b) Gelificação (estado de gel). (c) Vitrificação. (d) Cura total do material.



Fonte: ([ABREU et al., 2007](#)).

Para análise das mudanças físicas e químicas do processo de cura e para a determinação de temperaturas durante essa reação, o diagrama de transformação isotérmica de tempo e temperatura (TTT), ilustrado na [Figura 9](#), retrata as etapas desde o princípio da formação das ligações cruzadas à cura total, todas em função da temperatura e do tempo ([ZARGISKI et al., 2018](#)). O diagrama representa os quatro estados físicos da resina epóxi envolvidas nesta reação, sendo eles, líquido, borracha-gel, gel-vítreo e vítreo. A temperatura anterior ao princípio da reação, com a resina em estado líquido é ilustrada como (T_{g0}), reações de cura próximas a essa temperatura são lentas e ocorrem na forma vítrea. A segunda temperatura, esboçada como ($gelT_g$), trata-se da temperatura onde as etapas de gelificação e vitrificação coexistem. Por fim, tem-se a temperatura de transição vítrea da resina após finalizar seu processo de cura total (T_g), temperaturas acima desta aceleram o processo de cura e também de degradação do material ([GUIMARÃES, 2021](#)).

Figura 9 – Diagrama de transformação isotérmica de tempo e temperatura da resina epóxi.



Fonte: Adaptado de (ZARGISKI et al., 2018).

Para o aumento da quantidade de ligações cruzadas formadas e consequentemente das propriedades mecânicas adquiridas após a cura total da resina, realiza-se o tratamento de pós-cura, onde se adiciona calor novamente (abaixo da temperatura de degradação do material e próximo à temperatura de transição vítrea). Conforme observado no estudo de (DUTRA et al., 2019) esse processo de pós-cura também é responsável pelo aumento da temperatura de transição vítrea (T_g) da resina (ZARGISKI et al., 2018).

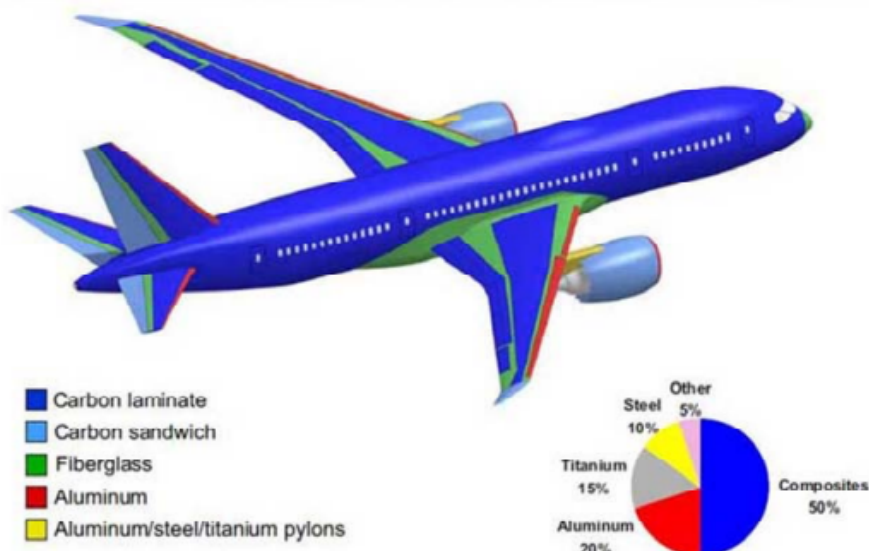
2.1.3 Fibras Sintéticas e Naturais

As fibras são os componentes responsáveis por suportar o carregamento mecânico do compósito, reforçando o material utilizado como matriz (NETO; PARDINI, 2016). Caracterizados por conta de sua alta relação de comprimento-diâmetro, apresentam dimensões de comprimento cerca de 200 vezes maiores que as dimensões de diâmetro. Ao comparar longas fibras em diferentes formas ao mesmo material em sua forma volumétrica, temos que a resistência das fibras superam, entretanto, para a determinação da resistência e rigidez do compósito, a geometria e a composição das fibras são imprescindíveis (JONES, 2018).

A classificação desses tipos de fibras é dada segundo a sua origem, sendo elas, fibras sintéticas (formadas por materiais sintéticos) e fibras naturais (podendo ser de origem mineral, vegetal ou animal). Atualmente na indústria aeronáutica os materiais mais utilizados são titânios, aço, compósitos estruturais reforçados com fibras de carbono ou fibras de vidro, além das estruturas sanduíche com faces de alumínio. Diferentemente do

padrão da aviação comercial, onde aeronaves como Airbus A320 e A380, são compostas em sua maioria por ligas de alumínio, as aeronaves da atualidade, como Airbus A350 e Boeing 787 (ilustrado na [Figura 10](#)) apresentam proporção de peso em materiais compósitos acima de 50% do peso total da aeronave ([BOUVET, 2017](#)).

Figura 10 – Materiais utilizados na fabricação do Boeing 787.



Fonte: ([RÊGO; SANTOS; MARINHO, 2020](#)).

Apesar das propriedades físicas gerais dos compósitos reforçados com fibras naturais não superarem as propriedades de compósitos reforçados com fibras de vidro, ainda sim, compósitos naturais apresentam inúmeras vantagens. Acima do fato de se tratar de uma matéria-prima renovável e conseqüentemente, ilimitada, a quantidade de CO_2 liberada no processo de obtenção ou aterro, é considerada neutra se comparado com compósitos sintéticos. Além disso, sua natureza abrasiva é consideravelmente menor, resultando em menor esforço no processamento e na reciclagem desses materiais. ([BLEDZKI; GASSAN, 1999a](#)).

2.1.3.1 Fibras de Vidro

Dentre os diferentes tipos de reforços para matrizes poliméricas compostas (PMC) existentes, as fibras de vidro são as mais utilizadas, devido sua gama de propriedades para diferentes aplicações. Esse tipo de reforço apresenta variedades de processos de fabricação, menor custo, baixa anisotropia, alta resistência química, alta resistência à tração e propriedades isolantes significativas. Embora apresentem baixa resistência à fadiga, baixo módulo de tração, alta densidade (ao compararmos com os demais tipos de fibras de reforços existentes) e alta dureza, esse reforço é visto em pequenos produtos elétricos à

componentes aeronáuticos de alto desempenho, como superfícies de controle e fuselagens (MOURA, 2021).

São vários os tipos de fibras de vidro existentes, conforme ilustrado na Tabela 1, onde as do tipo E, representam cerca de 90% das fibras de vidro disponíveis no mercado, uma vez que possuem o menor custo e abrangem diversas aplicações. As fibras do tipo S2 e R (objeto da presente análise) detêm de alta resistência e por isso são mais onerosas, normalmente utilizadas em componentes aeronáuticos e bélicos. Os tipos C, AR e ECR são utilizados para aplicações químicas que requerem maior resistência à corrosão, a alcalinos ou a ácidos. Por fim, fibras do tipo D apresentam características de radiofrequências transparentes, empregadas em componentes de aparelhos celulares (ANTUNES, 2019).

Tabela 1 – Tipos de fibras de vidro existentes.

Tipo	Característica
E	Fácil disponibilidade e baixo custo
C	Resistente à corrosão
D	Radiofrequência transparente
S2 e R	Alta resistência
AR	Resistente a alcalinos
ECR	Resistente a ácidos

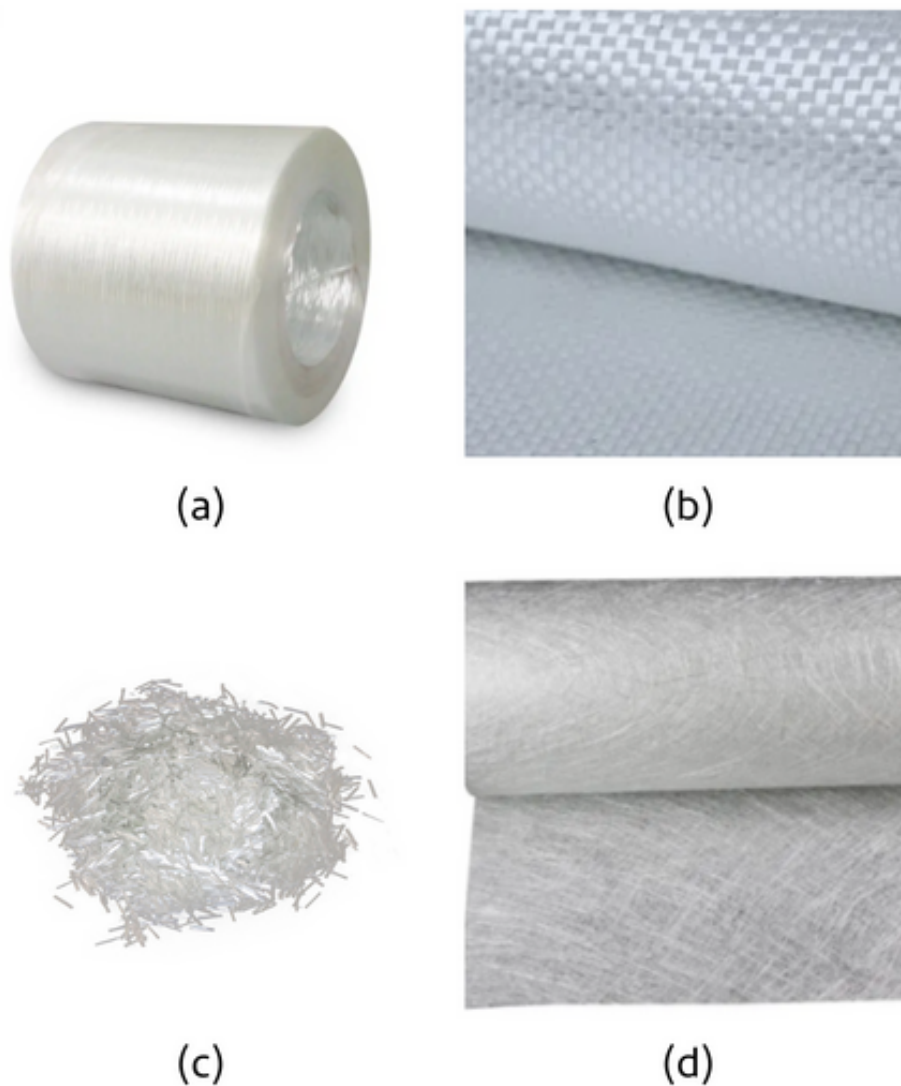
Fonte: (SIMS; BROUGHTON, 2000).

O principal componente das fibras de vidro é a sílica (SiO_2), além disso, outros óxidos como Al_2O_3 e B_2O_3 são acrescentados a fim de alterar a estrutura de rede da sílica, facilitando e aprimorando suas operações. O processo de obtenção dessas fibras é realizado a partir da mistura a seco desses ingredientes fundamentais e dos aditivos necessários para sua aplicação, os quais são posteriormente fundidos em um forno refratário com temperatura a cerca de 1370 °C. O vidro fundido é extrudado por uma bucha de platina com orifícios, onde se obtêm filamentos de cerca de 10 mm de diâmetro. Um revestimento protetor – composto de uma mistura de lubrificantes, agentes antiestáticos, aglutinantes e agentes de acoplamento – é adicionado aos filamentos individualmente, onde em seguida são unidos em um fio e enrolados em um tambor, resultando em um cordão (forma comercial básica) (HAMAD, 2019).

Dentre a variedade de formas vendidas, as comumente aplicadas estão ilustradas na Figura 11. Os *rovings*, Figura 11 (a), são compostos por fios paralelos não torcidos, enrolados em uma estrutura de formação cilíndrica, essa forma costuma ser utilizada em operações de enrolamento de filamentos e pultrusão. Os tecidos, Figura 11 (b), são obtidos a partir da disposição de *rovings* e do entrelaçamento entre eles, em iguais ou diferentes direções, onde as propriedades desses materiais estão atreladas às direções e gramaturas de fibras utilizadas. Além disso, os filamentos de fibras de vidro podem ser picados em fios

contínuos curtos (3,2 a 12,7 mm), [Figura 11 \(c\)](#), normalmente utilizados em operações de moldagem por injeção, ou em longos fios (50,8 mm), onde ao serem adicionados a uma resina, obtêm-se as mantas de fios picados, [Figura 11 \(d\)](#) ([MALLICK, 2007](#)).

Figura 11 – Diferentes formas de fibras de vidro: (a) *Rovings*. (b) Tecidos de *rovings*. (c) Fios picados. (d) Mantas de fios picados.



Fonte: ([NIU, 2022b](#)), ([E-COMPOSITES, 2022](#)) e ([NIU, 2022a](#)).

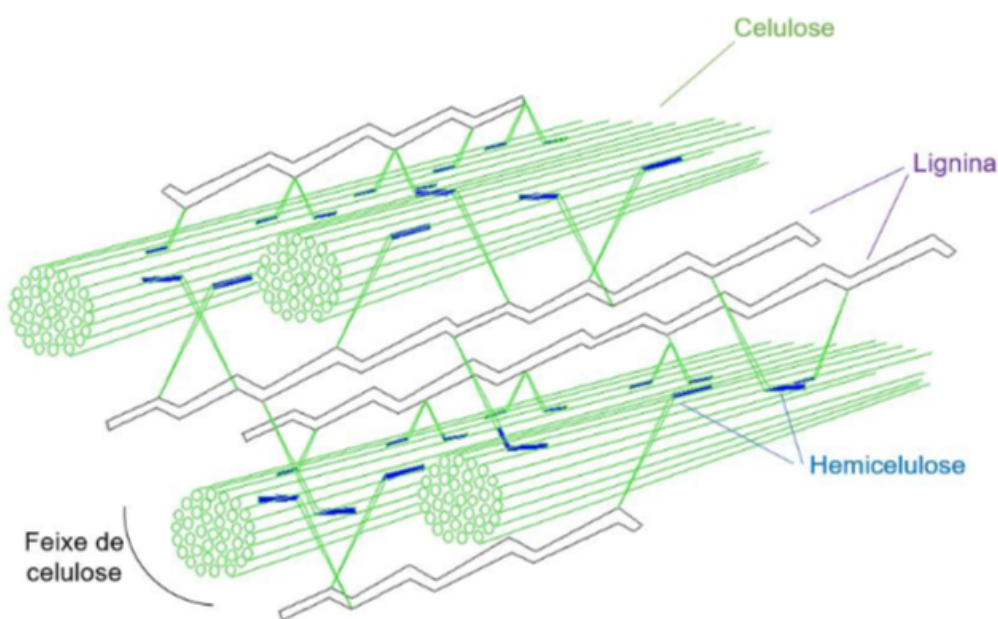
2.1.3.2 Fibras de Sisal

Diante do cenário atual, onde recursos derivados de petróleo não são fontes renováveis, a busca por materiais renováveis e sustentáveis com alta disponibilidade a baixo custo aumentaram o interesse da indústria nas fibras naturais de origem vegetal, entre elas, a fibra de sisal, em que faz parte de cerca de 70% da produção comercial de todas as fibras naturais. Esse tipo de reforço, apesar de apresentar boa resistência mecânica, têm

suas propriedades mecânicas variadas conforme o tipo de planta e as condições do clima e do solo onde foi cultivada (JESUS, 2018).

Essas fibras de sisal são formadas por compostos orgânicos e polímeros naturais conhecidos como celulose, hemicelulose e lignina (Figura 12). A celulose é a principal responsável pela rigidez da fibra e trata-se de um polímero de condensação composto por grupos hidroxila, onde esses grupos conseguem formar pontos irregulares (região amorfa) e redes de ligações de hidrogênio organizadas (região cristalina). A hemicelulose apresenta estrutura amorfa ramificada onde se firma à celulose, essa componente é facilmente solúvel em soluções alcalinas. Por último, a lignina é constituída por grupos aromáticos e alifáticos, essa componente concerne nas nervuras onde ocorre a formação do filamento da fibra, por isso, apresenta uma estrutura complexa e é altamente resistente à degradação (SILVA, 2020).

Figura 12 – Estrutura celular da fibra natural.



Fonte: (SILVA, 2020).

São diversas as espécies de plantas de sisal existentes, estas detêm do potencial para o cultivo em diferentes condições, desde ambientes quentes e úmidos às zonas de clima tropical. O tipo de sisal habitualmente comercializado é conhecido como *Agave Sisalana*, ilustrado na Figura 13 (a), onde se trata de uma planta de grandes folhas rígidas e grossas, com formatos de espadas e margens cobertas por espinhos. Normalmente uma única planta oferece cerca de 200 folhas comercializáveis, onde de cada uma dessas folhas obtêm-se cerca de 1000 feixes de fibras, Figura 13 (b) (MÜSSIG; STEVENS, 2010) (MIRANDA, 2011).

Figura 13 – *Agave Sisalana*. (a) Planta. (b) Feixes de fibras de sisal.

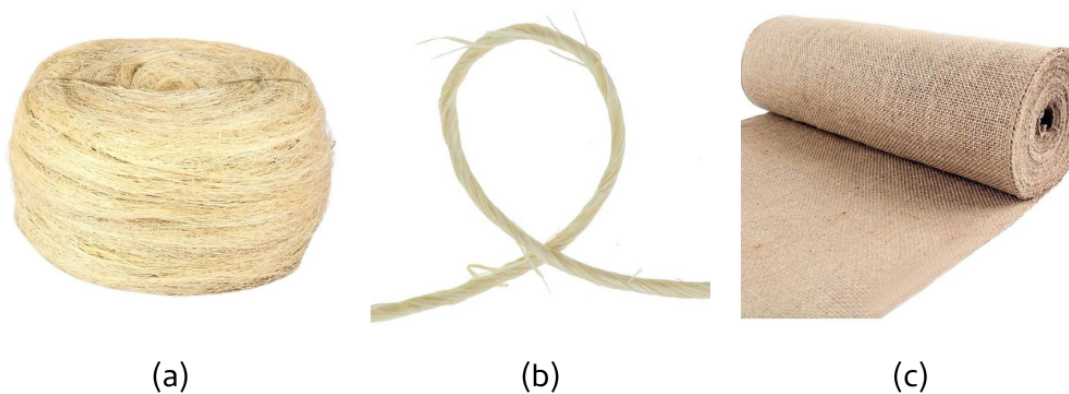
(a)

(b)

Fonte: (WORLDOFSUCCULENTS, 2022).

O processamento dessas fibras é realizado após 3-5 anos de cultivo da *Agave Sisalana*, onde cerca de 120 folhas são cortadas, para deixar apenas 30 folhas para o crescimento da planta até a próxima colheita – cerca de 1 ano e meio depois. A técnica utilizada para seu processamento depende de sua aplicação final, no entanto, as formas comercializadas são feixes de fibras de sisal fiados em fios, Figura 14 (a), frequentemente utilizados para formação de cordas ou mantas, onde ao serem torcidos originam as cordas de sisal, Figura 14 (b), as quais são posteriormente utilizadas na produção de tecidos. Além disso, feixes de sisal podem originar mantas por meio de processos como puncionamento, lapidação e cardação, Figura 14 (c), normalmente utilizado em reforços para compósitos (SILVA, 2018) (GENTRY, 1982).

Figura 14 – Diferentes formas de fibras de sisal. (a) Fio. (b) Cordão. (c) Tecido.



(a)

(b)

(c)

Fonte: (SISALSUL, 2022).

Compósitos reforçados com fibras de sisal são utilizados em diferentes aplicações,

a partir do campo da engenharia civil, com uso de telhas de sisal-cimento a revestimentos internos automotivos. Além de comportarem diferentes tipos de matrizes, com matrizes que variam de matrizes termofixas a borrachas. Estudos recentes para compósitos reforçados com esse tipo de fibra apresentam um ótimo potencial para aplicações estruturais, por suportarem os mesmos esforços de compósitos reforçados com fibras sintéticas, desde que tenham uma espessura adicional, onde esse incremento no volume total não implica em um aumento significativo de massa, uma vez que possuem massa específica inferior à das fibras sintéticas (VERA, 2012).

2.1.4 Adesão Fibra-Matriz

A adesão entre a fibra e a matriz é um dos principais fatores que influenciam nas propriedades mecânicas dos compósitos, uma vez que devem apresentar resistência de ligação suficiente para a transferência das cargas da matriz para às fibras de reforço. São diversos os tipos de adesão, podendo ser de natureza mecânica, química ou eletrostática, essas interfaces são dependentes do tipo de mecanismo e da presença de impurezas ou aditivos, como agentes de acoplamento. Os principais requisitos para uma boa adesão envolvem a habilidade da matriz (estado líquido) em manter contato com o reforço (estado sólido), além da proximidade entre os coeficientes de dilatação térmica dos materiais envolvidos e das frações de volume utilizadas (LOPES, 2017).

As fibras naturais apresentam caráter hidrofílico, dificultando sua capacidade de adesão. Conforme reportado na literatura, foram realizados estudos que evidenciaram a necessidade de modificação da superfície das fibras que apresentam baixa adesão (KU et al., 2011). O processo de mudança visa melhorar a interação entre a fibra e a matriz, podendo ser realizada com o uso de tratamentos químicos, agentes de acoplamentos ou criação de copolímeros grafitizados (copolímero derivado de um determinado monômero ligado a um polímero, originando um novo monômero) (CARVALHO, 2015).

Portanto, as fibras naturais de sisal, em interação com matrizes poliméricas, necessitam passar por esse processo físico ou químico, a fim de viabilizar seu uso. Em compósitos de resina epóxi reforçados com esse tipo de fibra, para aumento de sua adesão e consequentemente de sua resistência à tração. Em publicação recente, (RUIHUA; JAE-KYOO, 2007), os autores demonstraram que o processo mais efetivo quanto à essas propriedades trata-se do tratamento químico em soluções alcalinas. Esse método é normalmente realizado em dissoluções de bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$) ou hidróxido de sódio ($NaOH$) (SAURABH; INDERDEEP, 2018).

O tratamento com soluções de hidróxido de sódio ($NaOH$) tem sido largamente utilizado na indústria, uma vez que são eficientes e realizados com técnicas de fácil acesso. Dentre os componentes que constituem as fibras de sisal, a celulose é a única que apresenta resistência a soluções alcalinas, diante disso, a modificação gerada por esse tipo de processo

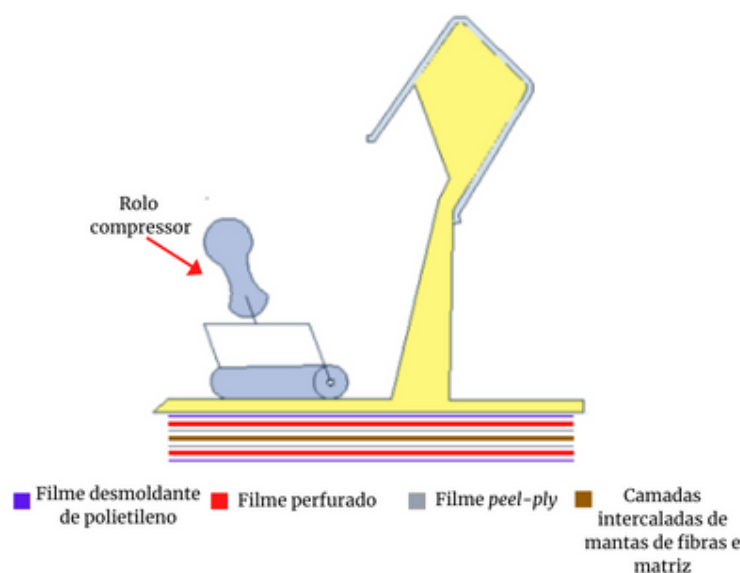
é baseada na dispersão parcial apenas da hemicelulose e da lignina presentes nas fibras, indicando maior presença de celulose e garantindo uma superfície rugosa com interface ideal (BLEDZKI; GASSAN, 1999b).

Em estudo recente com compósitos naturais de fibras de sisal, foram realizados testes de absorção de água e de residual após carregamentos cíclicos, onde o tratamento químico das fibras em soluções de $NaOH$ apresentaram um aumento significativo na resistência à exposição higrotérmica desses materiais, a melhora da adesão entre a fibra e a matriz foi a responsável pela diminuição da capacidade de absorção de água por essas fibras (BATISTA, 2022).

2.2 Processo de Fabricação Manual (*Hand Lay-up*)

A decisão sobre o processo de fabricação de compósitos envolve características econômicas, físicas e mecânicas, tornando-se um parâmetro importante na definição do desempenho final do material. A tecnologia de fabricação de compósitos por técnicas manuais é conhecida como *Hand Lay-up*, processo simples e de baixo custo para a obtenção de produtos moldados com fibras de reforço e matrizes poliméricas. Essa técnica é normalmente utilizada no meio acadêmico e na fabricação de peças complexas que não são viáveis em processos automatizados (SILVA, 2020).

Figura 15 – Processo de fabricação manual de compósitos.



Fonte: Adaptado de (SILVA, 2020).

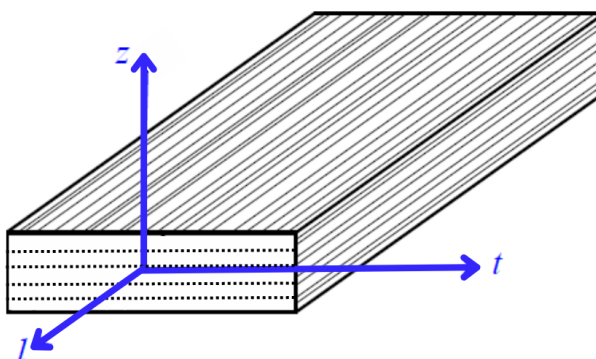
Esse procedimento consiste na aplicação de camadas intercaladas de resina-endurecedor com tecidos de fibras de reforço, a montagem é realizada entre três diferentes filmes (Figura 16) que visam a qualidade externa e a fácil remoção da peça do molde. Devido sua

função de desmoldante, o primeiro filme de polietileno é colocado em contato com o molde, em seguida um filme perfurado é disposto com a função de permitir a passagem do excesso de resina, por fim um tecido de poliamida *peel-ply* é colocado em contato direto com o laminado, sendo o responsável pela qualidade da superfície lisa do material. O conjunto de fibras intercaladas com uma matriz entre os diferentes filmes é vedado com a tampa do molde e prosseguido de um processo de compressão – responsável pela retirada de bolhas de ar no interior do compósito – até a cura completa da resina utilizada (BATISTA, 2022).

2.3 Mecânica dos Compósitos Laminados Unidirecionais

Compósitos laminados unidirecionais são formados pelo empilhamento de finas lâminas do conjunto fibra-matriz, esses materiais apresentam comportamento anisotrópico, uma vez que não há simetria entre os planos. No entanto, ao analisar a espessura de uma única camada é perceptível uma dimensão muito inferior às demais, sendo assim é possível realizar uma simplificação considerando as tensões nas direções fora do plano iguais a 0, conforme a equação 2.1.

Figura 16 – Sistemas de coordenadas de um compósito laminado. (l) Eixo longitudinal; (t) Eixo transversal e (z) Direção fora do plano.



Fonte: Adaptado de (BOUVET, 2017).

$$\sigma_z = \tau_{tz} = \tau_{lz} = 0 \quad (2.1)$$

Onde σ_z , trata-se da tensão normal na direção z (ao longo da espessura do laminado), e τ_{tz} e τ_{lz} das tensões de cisalhamento nos planos tz e lz .

Diante disso, essa suposição considera esses laminados como materiais ortotrópicos, isto é, materiais com três planos de simetria ortogonais entre si, sendo eles: (l, t) , (t, z) , (l, z) e (l, t, z) , onde suas propriedades mecânicas dependem das direções observadas. A matriz de tensão desse tipo de material é ilustrada na relação 2.2 (BOUVET, 2017).

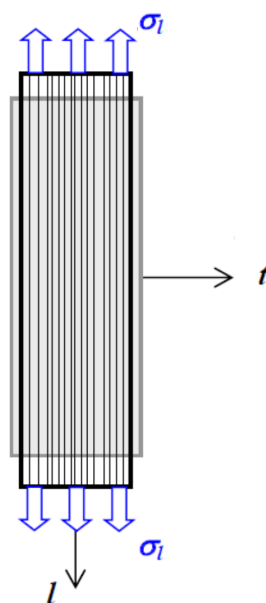
$$\sigma(M) = \begin{bmatrix} \sigma_l & \tau_{lt} & 0 \\ \tau_{lt} & \sigma_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{(l,t,z)} \quad (2.2)$$

Para ensaios de tração ao longo da direção longitudinal (l) das fibras, a amostra de corpo de prova se mantém em sua forma retangular, no entanto, durante a distensão na direção longitudinal é possível observar um encolhimento ao longo da direção transversal, conforme a [Figura 17](#). Para o cálculo da tensão e da deformação durante este processo, temos as relações [2.3](#) e [2.4](#):

$$\sigma(M) = \begin{bmatrix} \sigma_l & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{(l,t)} \quad (2.3)$$

$$\epsilon(M) = \begin{bmatrix} \epsilon_l & 0 \\ 0 & \epsilon_t \end{bmatrix}_{(l,t)} \quad (2.4)$$

Figura 17 – Tensão aplicada no eixo longitudinal para ensaio de tração.



Fonte: Adaptado de ([BOUVET, 2017](#)).

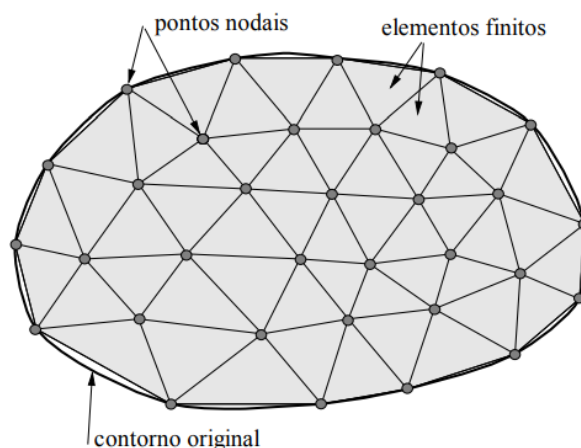
Onde ao manter o aumento da carga haverá a tendência a se deformar linearmente em função da tensão, de forma que resulte em uma ruptura (equação [2.5](#)). O módulo de elasticidade na direção longitudinal é considerado E_l e o coeficiente de Poisson também ao longo da direção longitudinal como ν_{lt} .

$$\begin{cases} \epsilon_l = \frac{\sigma_l}{E_l} \\ \epsilon_t = -\nu_{lt} \frac{\sigma_l}{E_l} = -\nu_{lt} \cdot \epsilon_l \end{cases} \quad (2.5)$$

2.4 Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos (MEF) é uma das técnicas numéricas amplamente aplicada para a obtenção de soluções aproximadas de modelos físicos reais. Atualmente, é operada de maneira demasiada pela indústria aeroespacial, uma vez que se obtêm resultados próximos ao real, havendo a viabilidade de diferentes tipos de análises e soluções, sem adição ao custo para a fabricação do modelo físico real. Esse método abrange a discretização de sistemas contínuos, isto é, a segmentação e a solução de um domínio contínuo em pequenos elementos sub-contínuos, conhecidos como elementos finitos, onde as funções de estudo estão associadas a valores nodais (Figura 18) (SILVA et al., 2019).

Figura 18 – Elementos sub-contínuos.



Fonte: (SALES, 2022).

Utilizando de equações diferenciais para a caracterização dos elementos finitos que compõem o domínio contínuo a ser solucionado, a resolução do problema da estrutura é dada pelo somatório dos resultados de cada um desses elementos. Análises numéricas mecânicas são segmentadas em estáticas ou dinâmicas, podendo apresentar comportamento linear ou não linear, onde o objeto de estudo do presente trabalho envolve análises estáticas não lineares de materiais compósitos (PACHECO, 2016).

Os primeiros estudos envolvendo MEF foram realizados com estruturas reticuladas, logo com o seu surgimento. No entanto, com a progressiva solicitação pela indústria aeroespacial, por estruturas mais leves e aplicações na mecânica dos fluidos, deteve-se o desenvolvimento de estruturas mais complexas e conseqüentemente de estudos numéricos envolvendo essas estruturas. Na década de 50, a companhia Boeing passou a utilizar

elementos triangulares a fim de modelar as asas das aeronaves via MEF (GUIMARÃES, 2018). Enquanto na literatura recente, pesquisas contendo análises via elementos finitos com compósitos reforçados com fibras de vidro ou fibras de sisal, em sua maioria abrangem materiais para aplicações na Engenharia Civil, isto é, concretos armados com diferentes reforços.

Em análises recentes, de (SILVA et al., 2022) e (FRANCKLIN et al., 2019), por meio de concretos armados reforçados com barras de fibra de vidro e com fibras de sisal, observaram a necessidade de um refino nos dados utilizados na simulação para a construção de um modelo mais condizente com a realidade. Já no trabalho de (BRANCO; FIGUEIREDO; FUJIYAMA, 2021), realizado a partir da comparação das propriedades elásticas de polímeros reforçados por fibras de vidro, observou-se que o método de elementos finitos concedeu um caminho implícito de modelagem desses materiais, colaborando para uma melhor visualização das distribuições de cargas entre os materiais utilizados como reforço e matriz. Todavia, estudos acadêmicos utilizando o método dos elementos finitos, visando a comparação dos compósitos naturais e híbridos para aplicações estruturais na aeronáutica, ainda é restrito.

Segundo (CAMPILHO, 2012), a análise numérica envolvendo o MEF é dividida em três diferentes etapas, sendo elas, o pré-processamento, a análise e o pós-processamento. A primeira etapa do processo requer tempo e atenção, uma vez que se trata da modelagem do problema e dos fatores que o influenciam, compreendendo as hipóteses que serão utilizadas, as variáveis e a geometria a ser analisada. Nesta etapa são definidas as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos, as condições de contorno iniciais, os carregamentos em que a estrutura será submetida, a escolha do tipo de elemento e do refino da malha. A segunda etapa envolve a análise numérica e conseqüentemente a solução do problema analisado. Enquanto a última etapa, conhecida como pós-processamento, consiste na interpretação da solução encontrada e na coleta dos resultados esperados.

2.5 Caracterização dos Materiais

Os principais métodos de caracterização dos compósitos laminados sintéticos, naturais e híbridos do vigente trabalho envolvem: ensaio de tração e análise térmica antes da cura e após a pós-cura da resina epóxi.

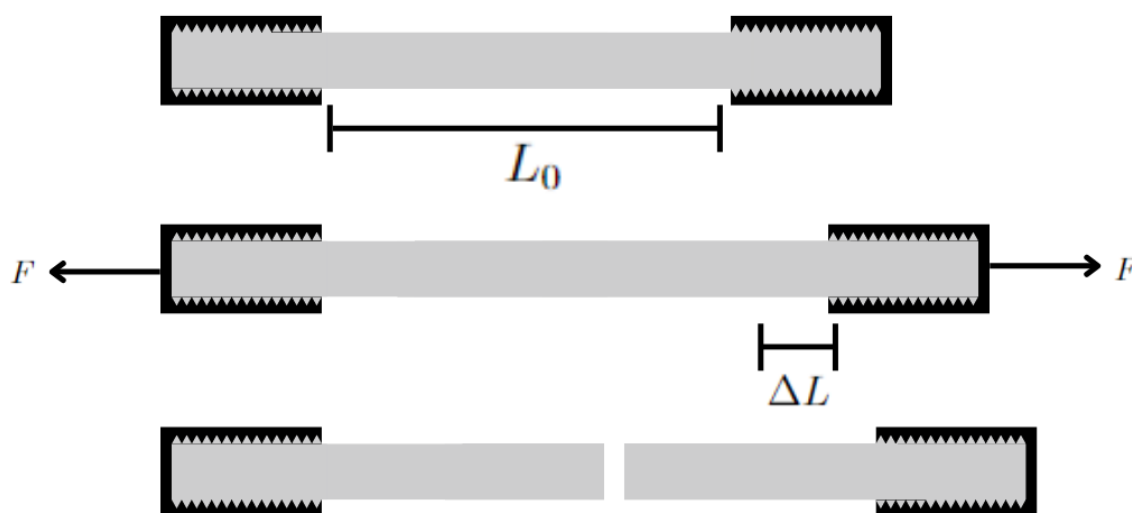
2.5.1 Ensaio de Tração (ASTM D3039)

Um ensaio de tração em compósitos reforçados com fibras é um teste utilizado para determinar a resistência mecânica de um material compósito reforçado com fibras. Este teste consiste em aplicar uma carga de tração a uma amostra de material, enquanto mede-se a deformação ocasionada e a carga aplicada no material, até que haja a falha

desse material. As fibras unidirecionais apresentam melhor desempenho mecânico do que as fibras orientadas em várias direções, devido à sua alta orientação na direção da carga. Isso significa que as fibras unidirecionais estão alinhadas na direção da carga aplicada, o que resulta em uma maior transferência de carga para as fibras e, conseqüentemente, em uma maior resistência mecânica (AKOVALI, 2001) (MALLICK, 2007) (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

A norma que regimenta os procedimentos para esses ensaios em materiais compósitos de matrizes poliméricas reforçados por fibras de alto módulo é conhecida como ASTM D3039. Entre os fatores que influenciam esses resultados entregues nesses testes, estão, o processo de fabricação, a orientação e a sequência das camadas de fibras, o ambiente e a velocidade de teste, a presença ou não de vazios no interior do corpo de prova e claro, os tipos de materiais utilizados e suas respectivas frações volumétricas (ASTM, 2002). Um esquemático do processo envolvido neste ensaio e das geometrias normatizadas encontram-se ilustrados na Figura 19 e Figura 20.

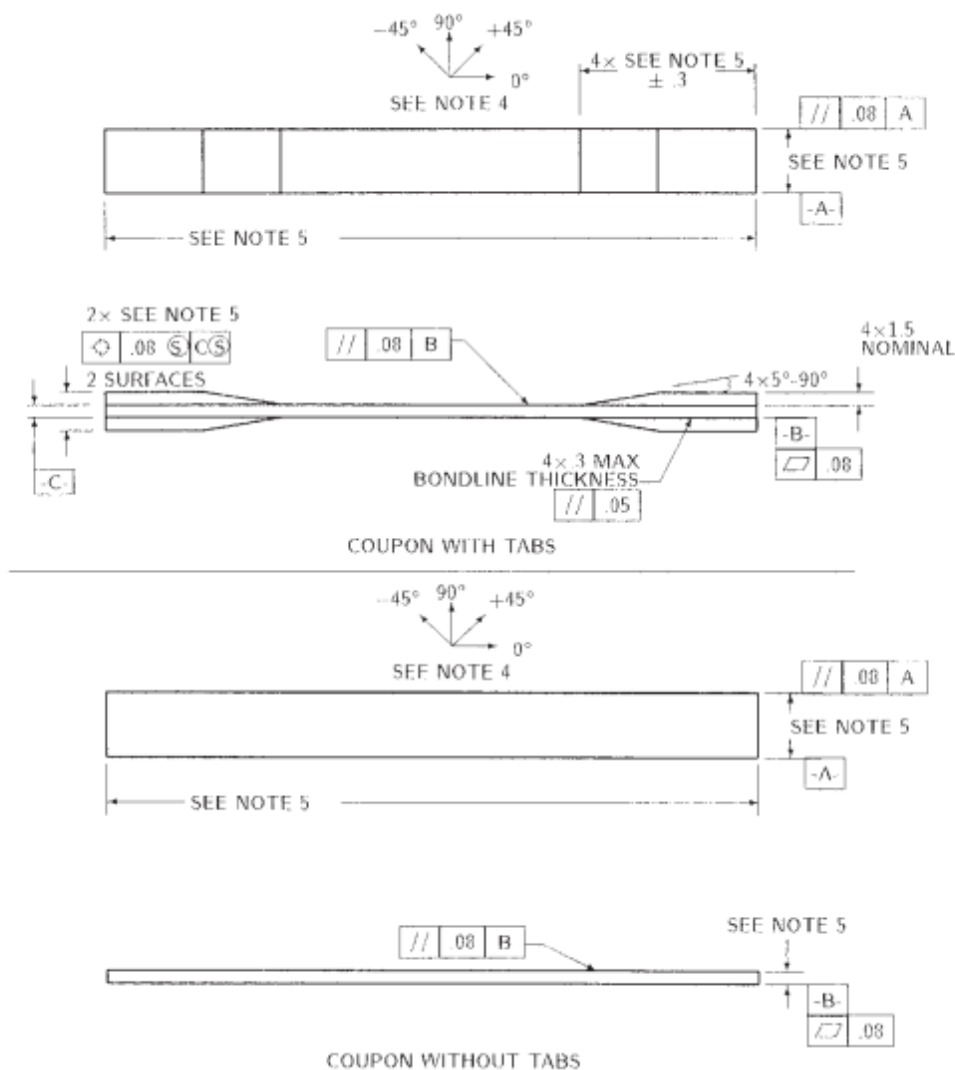
Figura 19 – Ilustração do processo do ensaio de tração.



Fonte: Adaptado de (GERMANO, 2022).

As condições necessárias para realizar o teste como velocidade de tração, conservação dos compósitos e geometria dos corpos de prova para fibras com orientação a 0° unidirecionais são normatizadas pela ASTM. A geometria para as amostras de testes também é padronizada e encontra-se ilustrada na Figura 20, onde não há necessidade de adição de abas às extremidades do corpo de prova, apenas uma boa fixação destes à máquina, de modo que a direção da carga coincida com a direção das fibras, mantendo o alinhamento e uma boa distância entre o medidor e as garras (ASTM, 2002).

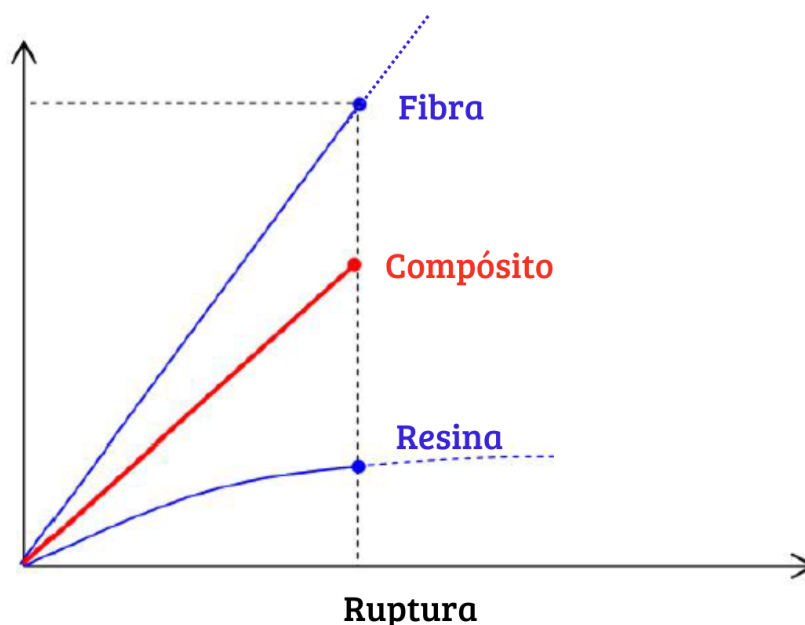
Figura 20 – Geometrias normatizadas para os corpos de prova.



Fonte: (ASTM, 2002).

Para a realização do teste de tração, cinco amostras de corpos de provas iguais são submetidas (separadamente) à aplicação de uma carga uniaxial crescente, onde os dados referentes à carga aplicada e a deformação sofrida pelas amostras são utilizados para a construção dos gráficos carga-deformação e tensão-deformação do material (Figura 21). Essa associação é resultante das aplicações envolvidas nas relações entre carga-tensão e variação de comprimento da área útil da amostra (ΔL) e deformação. Esta primeira, encontra-se representada na equação 2.6, onde a (F_{ta}) é a força de tração aplicada e (S_0) a área transversal do corpo de prova. Enquanto a relação de deformação é dada pela razão entre a variação de comprimento da área útil (ΔL) e o comprimento inicial (L_0), conforme a equação 2.7.

Figura 21 – Diagrama tensão-deformação.



Fonte: Adaptado de (BOUVET, 2017).

$$\sigma = \frac{F_{ta}}{S_0} \quad (2.6)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (2.7)$$

As demais propriedades estabelecidas neste ensaio, como o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, são calculadas conforme as equações 2.8 e 2.9. Onde o módulo de elasticidade (E) é resultante da inclinação da curva do gráfico tensão-deformação, ilustrado na Figura 21 e o coeficiente de Poisson (ν) pela razão entre as variações de deformações transversal ($\Delta\epsilon_t$) e longitudinal ($\Delta\epsilon_l$).

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (2.8)$$

$$\nu = -\frac{\Delta\epsilon_t}{\Delta\epsilon_l} \quad (2.9)$$

Para maior adequação nas condições de instrumentação e calibração dos equipamentos utilizados em teste, a determinação das propriedades específicas dos materiais envolvidos é imprescindível (ASTM, 2002). Baseado na análise de compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de sisal e/ou vidro, os dados das propriedades destes materiais estão ilustrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades específicas das fibras e da resina epóxi utilizadas.

Tipo	Densidade (g/cm^3)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Elongação na ruptura (%)
Vidro do tipo R	2,55	2000-3500	81,3	4,8
Sisal	1,45	468-700	30	2,0
Epóxi DGEBA	1,15	65-75	2,8-3,2	7-10

Fonte: (SILVA, 2015), (JUNIOR, 2019) e (E-COMPOSITES, 2022).

2.5.2 Análise Térmica

Para a caracterização do comportamento térmico dos compósitos foram realizadas análises Termogravimétrica (TGA) e de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC). A primeira envolve a decomposição e a estabilidade térmica desses materiais baseando-se em diferentes condições de temperatura. A segunda, conhecida como DSC, verifica a energia em processos endotérmicos ou exotérmicos, durante períodos e temperaturas pré-estabelecidas. A curva resultante destes processos determina as temperaturas de transição vítrea e das diferentes etapas durante a degradação do material, além da entalpia (ΔH) vinculada a esses processos e o grau de cura (α_{cura}) da amostra (JUNIOR, 2019).

A análise termogravimétrica (TGA) compreende a variação de massa do material em função do aumento de temperatura. A curva TG determina a temperatura máxima onde não ocorre degradação da amostra analisada, conhecida como temperatura de estabilidade térmica (T_{est}) e as temperaturas de início (T_{onset}) e final (T_{endset}) de decomposição do material. Para o arranjo matemático desta técnica e visualização de possíveis reações sobrepostas, a derivada da TG, conhecida como DTG, consiste no registro em função do tempo ou da temperatura da variação de massa com relação ao tempo, essa curva expõe o pico onde houve a maior perda de massa referente a temperatura de degradação máxima (T_{pico}) do material (JUNIOR, 2019).

A análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) compreende a observação dos processos físicos e químicos diante da variação de energia, esse ensaio é amplamente utilizado para avaliação das reações de cura da resina epóxi. A primeira variação da curva DSC é representada pela temperatura de transição vítrea (T_g) do material, os altos picos exotérmicos são característicos de materiais não curados, onde a extensão e o achatamento destes representam o princípio da cura, onde as ligações cruzadas passam a se estabelecer. Durante esse processo de cura, ao analisar as variações das entalpias envolvidas (ΔH) nessas reações - parâmetro determinado segundo a integração da área abaixo do pico de cura -, comparando o calor exotérmico residual da amostra ($\Delta H_{residual}$) com o calor da reação de uma amostra não curada ($\Delta H_{antes da cura}$), tem-se o grau de cura do material, conforme a equação 2.10 (JUNIOR, 2019).

$$\alpha_{cura} = 1 - \frac{\Delta H_{residual}}{\Delta H_{antes da cura}} \quad (2.10)$$

O equipamento para realizar essas análises térmicas simultaneamente é composto por uma termo-balança com sistema registrador em atmosfera controlada – onde ocorre a pesagem contínua da amostra do material submetida ao aquecimento ou resfriamento constante e o registro do fluxo de calor em função da temperatura. Dentre os fatores instrumentais que afetam os resultados da análise estão a velocidade em que é realizado o registro das medidas, a razão de aquecimento e a atmosfera do forno (SILVA, 2017).

2.5.3 Espaços Vazios

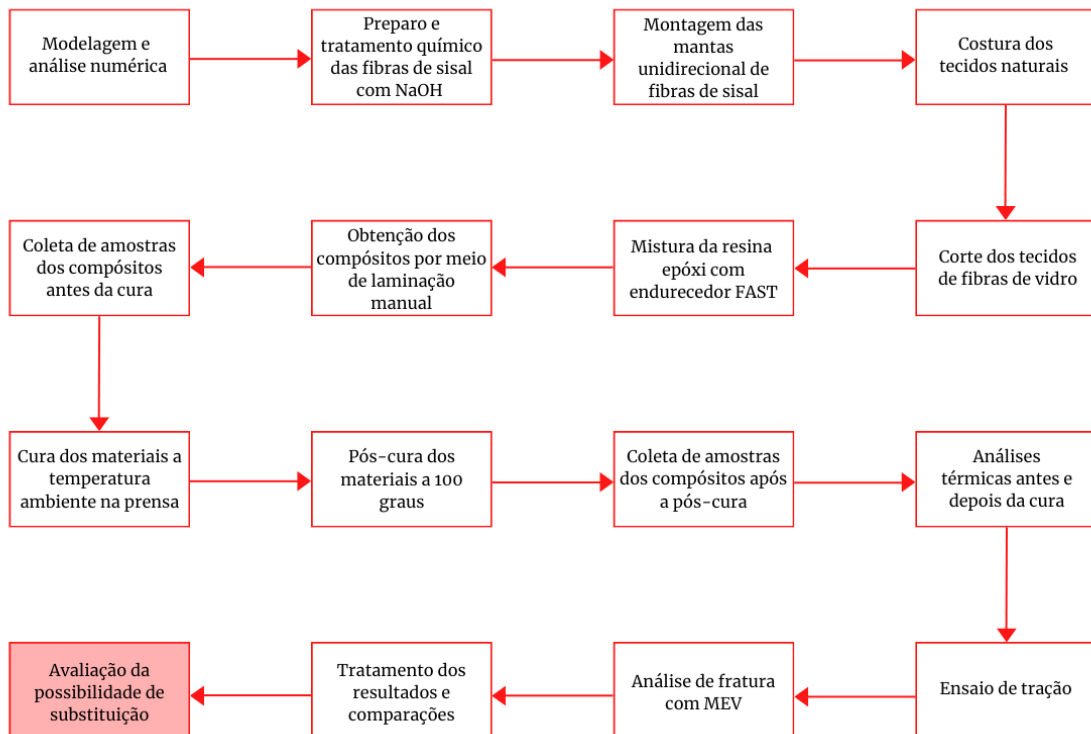
Os materiais compósitos são heterogêneos devido à dispersão de fibras, a presença de bolhas e conseqüentemente, espaços vazios. Esses espaços são regiões onde não há presença de matriz ou fibra e são causados por bolhas de ar, por uma inadequada distribuição de fibras durante o processo de fabricação manual ou por uma má compactação do material. A presença desses vazios afeta negativamente o desempenho mecânico dos materiais compósitos finais, pois representam pontos fracos no material, os quais podem ser facilmente danificados sob aplicação de cargas (GALLI, 2016).

A fração volumétrica dos materiais afeta diretamente a quantidade de espaços vazios presentes em materiais compósitos. Quanto maior a fração volumétrica de fibras, menor será a quantidade de espaços vazios, pois há menos espaço para bolhas de ar e inadequada distribuição de fibras. Por outro lado, quanto menor a fração volumétrica de fibras, maior será a quantidade de espaços vazios, devido à maior presença de bolhas e inadequada distribuição de fibras (GALLI, 2016).

3 Metodologia de Trabalho

Neste capítulo, serão abordadas as metodologias utilizadas para a simulação das diferentes análises, bem como para a fabricação e a caracterização dos compósitos sintéticos, naturais e híbridos. Entre eles estão, o método de elementos finitos utilizado para a simulação numérica, o tratamento químico das fibras naturais, o processo *hand lay-up* para obtenção dos corpos de prova, o ensaio de tração e as análises térmica e morfológica. O fluxograma dos procedimentos realizados no presente trabalho encontra-se ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Fluxograma das metodologias utilizadas para a produção do trabalho.



Fonte: De autoria própria.

3.1 Modelagem e Análise Numérica via MEF

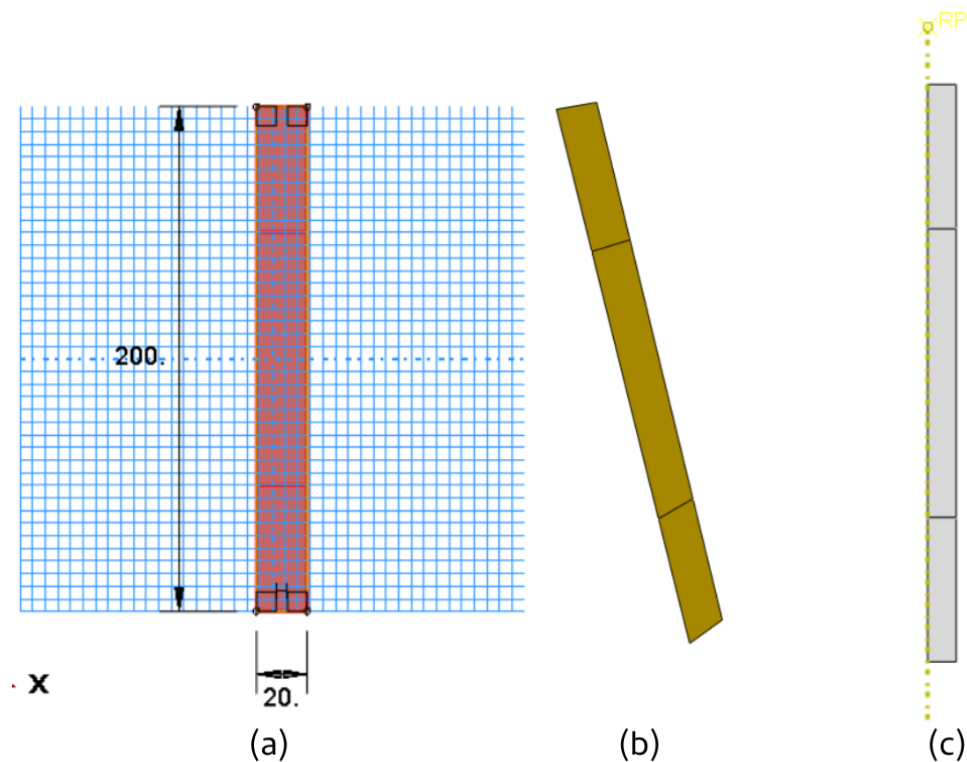
As análises numéricas utilizando os métodos dos elementos finitos foram realizadas através do *software* Abaqus-CAE. Este programa possibilita a construção do *lay-up* dos compósitos e a determinação de propriedades específicas para cada uma das camadas. A análise consiste em três etapas, sendo elas, pré-processamento, análise e pós-processamento.

No pré-processamento, a geometria é modelada como casca, os parâmetros dos materiais, como densidade e propriedades mecânicas, são definidos e as condições de contorno são estabelecidas. Além disso, esta etapa abrange a escolha dos tamanhos e tipos de elementos utilizados para a obtenção da malha da geometria. Durante o processamento, a simulação é realizada no ambiente de trabalho (*Job*) do Abaqus-CAE. Finalmente, no pós-processamento, a solução encontrada é compartilhada, e as curvas de tensão-deformação são obtidas.

3.1.1 Geometria e Propriedades dos Materiais

Para a análise numérica via método dos elementos finitos, inicialmente foi feita a modelagem da geometria do corpo de prova utilizando suas dimensões reais - como mostrado na Figura 23 (a). No entanto, para reduzir o esforço computacional e o tempo de processamento da simulação, foi feita uma simplificação. Essa simplificação incluiu a adição de condições de contorno para realizar a análise apenas na metade da amostra, mostrado na Figura 23 (c). Esta geometria simplificada foi utilizada para todos os compósitos, com a única diferença sendo a quantidade de camadas e os materiais utilizados em cada camada.

Figura 23 – (a) Dimensões da geometria. (b) Superfície do corpo de prova. (c) Versão simplificada.



Fonte: De autoria própria.

Após a modelagem da geometria, foram criados os materiais envolvidos no estudo como *laminas*. Para isso, foram declaradas propriedades, como, densidade teórica (ρ_t), módulo de elasticidade longitudinal (E_1), módulo de elasticidade transversal (E_2), coeficiente de Poisson no plano principal (ν_{12}), módulo de cisalhamento no plano (G_{12}), módulos de cisalhamento fora do plano (G_{23} e G_{13}), resistência à tração longitudinal (F_{1l}), resistência à compressão longitudinal (F_{1c}), resistência à tração transversal (F_{2t}), resistência à compressão transversal (F_{2c}) e resistência ao cisalhamento transversal (F_{23}). Os valores utilizados quanto a essas propriedades encontram-se ilustrados nas Tabelas B.1, B.1 e B.1.

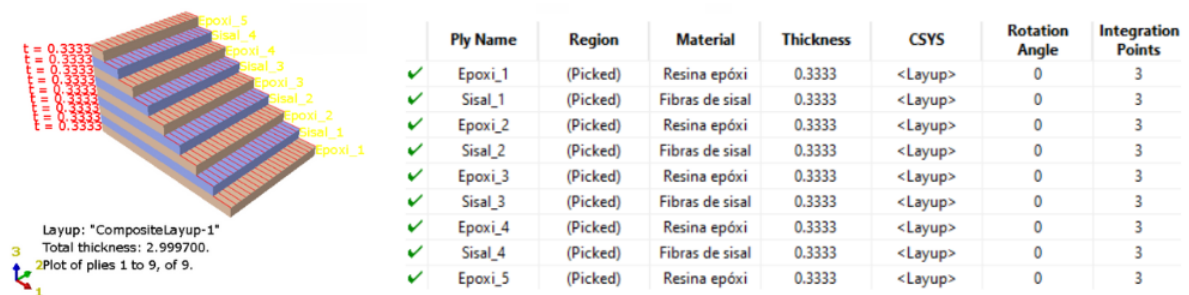
As seções foram então definidas usando as propriedades do material, número de camadas, espessuras, orientações das fibras e propriedades associadas a cada material. Veja as Figuras 24, 25 e 26, onde essas configurações referem-se aos compósitos sintéticos, naturais e híbridos, respectivamente.

Figura 24 – Configuração das camadas do compósito sintético.



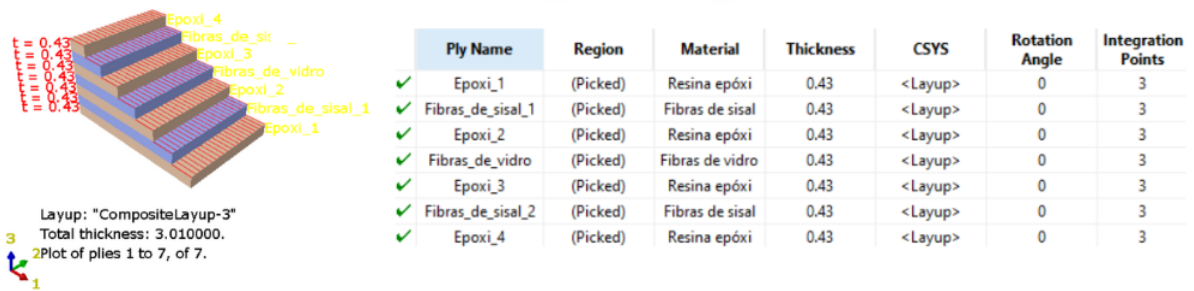
Fonte: De autoria própria.

Figura 25 – Configuração das camadas do compósito natural.



Fonte: De autoria própria.

Figura 26 – Configuração das camadas do compósito híbrido.

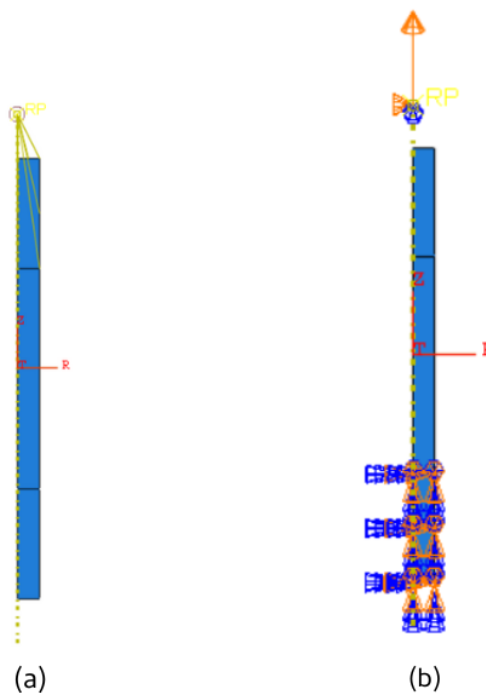


Fonte: De autoria própria.

3.1.2 Esforços e Condições de Contorno

Finalizada a modelagem do objeto de estudo, a segunda etapa do pré-processamento envolveu a aplicação das condições de contorno para ensaios de tração e para a simplificação realizada na geometria. Além disso, para o registro dos esforços e para a obtenção das respostas de tração do corpo de prova, foram criados um ponto de referência – espaçado a cerca de 20 mm acima da aba superior do corpo de prova – e uma região de acoplamento entre este ponto e a superfície de contato que traciona o corpo de prova (aba superior) – Figura 27 (a).

Figura 27 – (a) Condição de acoplamento com o ponto de referência. (b) Condições de engaste, movimento restrito e deslocamento.



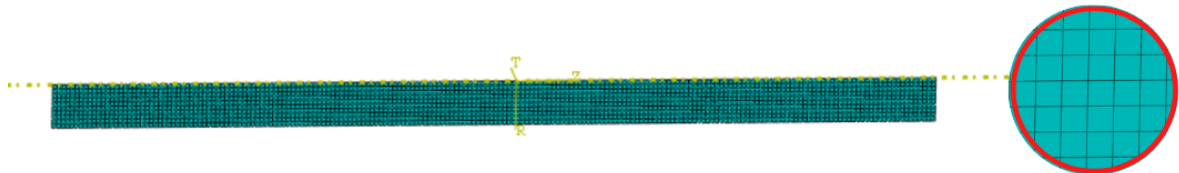
Fonte: De autoria própria.

Para os carregamentos, foram definidas três condições de contorno, sendo elas, o engaste, a região de simetria e o deslocamento. A condição de engaste, responsável pela restrição de qualquer movimento ou rotação, foi aplicada na aba inferior do corpo de prova. Enquanto a restrição do movimento na região de simetria foi aplicada ao ponto de referência, dessa forma, contendo o movimento na direção x e possíveis rotações no eixo z . Por fim, a condição de contorno referente ao movimento realizado durante o ensaio de tração, que consiste no deslocamento na direção do eixo y – Figura 27 (b) –, aplicada ao ponto de referência.

3.1.3 Escolha da Malha

O método de elementos finitos consiste na subdivisão da geometria em pequenos elementos, onde esses elementos podem apresentar diferentes geometrias e estão conectados entre si por meio de nós, o conjunto desses nós é conhecido como malha. Diante disso, o tamanho dos elementos da malha e a quantidade de nós presente na geometria são fatores que influenciam diretamente na precisão dos resultados e no tempo de esforço computacional para o processamento da análise. No presente trabalho foram adotados elementos com dimensões de 1 mm x 1 mm, resultando em uma malha linear quadrilateral com cerca de 2000 elementos do tipo C4X4R – Figura 28.

Figura 28 – Malha gerada.



Fonte: De autoria própria.

Tabela 3 – Características da malha gerada.

Características	
Tamanho do elemento	1 mm
Tipo de elemento	Explícito com eliminação de elementos para tensões de rupturas ultrapassadas
Controle de malha	<i>Quad</i>
Quantidade de nós	2211
Elementos	2000

Definidas as condições de contorno para a simulação e criada a malha de elementos finitos, a etapa seguinte trata-se do processamento da análise e posteriormente do tratamento dos dados entregues. Durante a análise dos resultados, foram gerados dados XY combinando informações de deslocamento e força aplicada, permitindo a obtenção das distribuições de tensões, deformação e deslocamento dos corpos de prova, especificamente no elemento próximo à região de fratura.

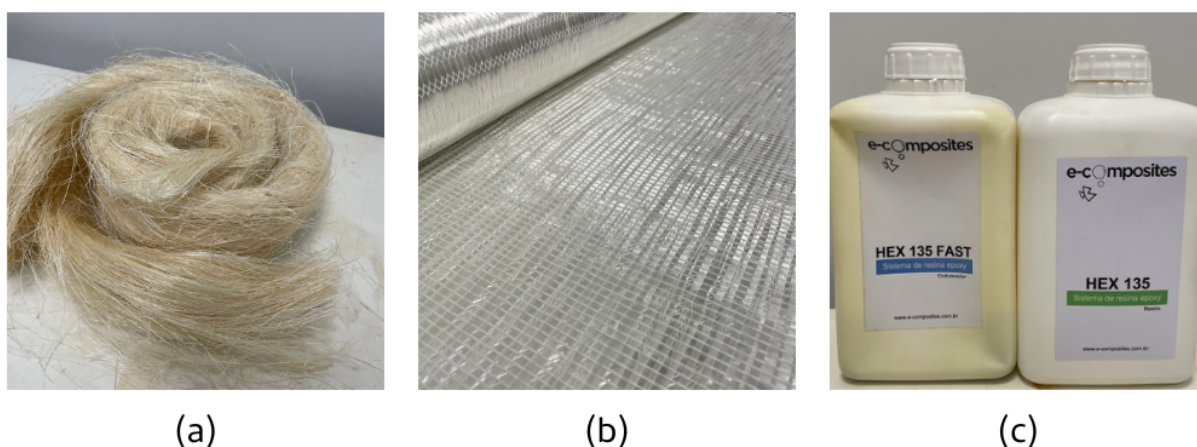
3.2 Processo de Laminação Manual

Esta seção apresenta o processo de fabricação dos compósitos por laminação manual, detalhando as etapas e os materiais utilizados para a obtenção dos resultados alcançados.

3.2.1 Materiais e Métodos

A Figura 29 apresenta os materiais utilizados no estudo. As fibras de sisal *in natura*, mostradas na Figura 29 (a), foram obtidas da empresa SisalSul Indústria e Comércio LTDA, que forneceu tramas simples de 1 m (SISALSUL, 2022). O tecido unidirecional de fibras de vidro do tipo R, mostrado na Figura 29 (b), e o conjunto de resina epóxi e endurecedor HEX 135 FAST, mostrados na Figura 29 (c), foram adquiridos com a empresa E-Composites Comércio de Materiais Compostos LTDA (E-COMPOSITES, 2022).

Figura 29 – Materiais utilizados para a confecção dos compósitos: (a) Fibras de sisal *in natura*. (b) Tecido unidirecional de fibras de vidros do tipo E. (c) Endurecedor HEX 135 FAST e resina epóxi HEX 135.



Fonte: De autoria própria.

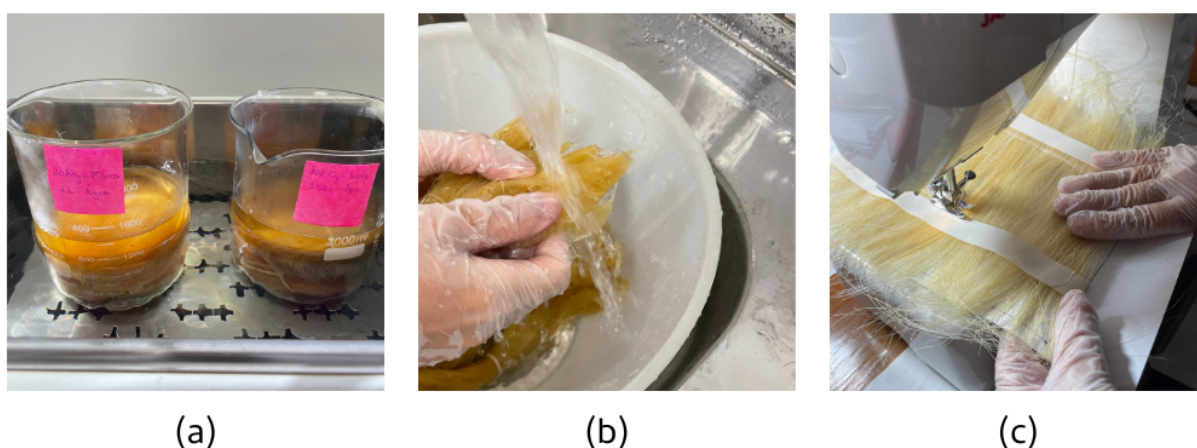
3.2.2 Preparação das Fibras Naturais

Para facilitar o tratamento químico dos reforços naturais, as fibras de sisal *in natura* foram cortadas em pedaços de cerca de 25 cm de comprimento e amarradas em feixes. Em seguida, para a melhora da adesão, as fibras passaram por um tratamento químico em banho-maria. A primeira etapa consistiu em hidratar os feixes em água destilada por 2 horas a cerca de 80 °C. Após esse passo, as fibras foram filtradas e mergulhadas por mais 2 horas a 50 °C em uma solução de 5% (m/v) de hidróxido de sódio (NaOH) – Figura 30 (a). Conforme o método descrito em estudos recentes, foi utilizada a proporção de 10:1 (solução: fibra) (BATISTA, 2022) (TEIXEIRA, 2019). Durante ambas as etapas, a mistura foi agitada a cada minuto para promover o contato da solução com toda a extensão da fibra.

Após o tratamento químico, inicialmente com pH básico, as fibras foram lavadas em água destilada para remover o excesso de solução da superfície e alcançar pH 7 – Figura 30 (b). Em seguida, essas fibras foram secas a temperatura ambiente por 96 horas, e escovadas para remover os nós e alinhar as fibras. Antes da manufatura dos compósitos, esses tecidos foram secos em estufa a 60 °C, conforme estudos realizados recentemente, por 24h para a eliminação de umidade residual.

Por fim, os tecidos unidirecionais foram obtidos a partir da disposição alinhada do número de fibras correspondente a 20% do volume total da placa-molde (132 cm³) e costurado perpendicularmente ao seu eixo principal, conforme ilustrado na Figura 30 (c).

Figura 30 – Processo para obtenção das mantas de fibras naturais: (a) Tratamento químico com NaOH. (b) Enxágue pós tratamento. (c) Confeção dos tecidos unidirecionais.



Fonte: De autoria própria.

A escolha da porcentagem de fibras teve como base a consideração de dois principais fatores: o primeiro envolveu a facilidade de aplicação da resina na placa, enquanto o

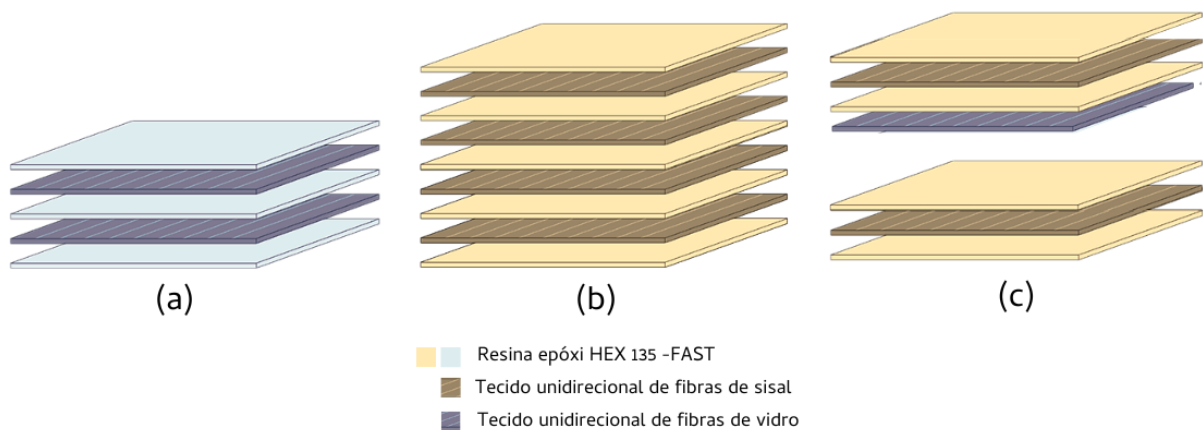
segundo corresponde ao peso dos tecidos de fibras de vidro, que foram adquiridos prontos e precisavam estar de acordo com as dimensões do molde. Nesse sentido, os tecidos de fibras de sisal foram fabricados de modo a atender a essa condição de forma satisfatória, por isso, as diferentes condições quanto as quantidades de camadas de tecidos.

3.2.3 Preparação dos Corpos de Prova

A fabricação dos corpos de prova foi realizado de forma similar para todos os compósitos, variando apenas a quantidade de camadas e o tipo de material utilizado nos tecidos unidirecionais. A disposição das camadas de resina epóxi e fibra foi planejada para atingir a espessura final de 3 mm do molde e uma concentração de fibras de 20% do volume total do compósito.

Para isso, cada compósito possui uma disposição de camadas diferente, como por exemplo, o compósito híbrido, que contém uma camada de fibra de vidro disposta entre duas camadas de fibra de sisal, alternadas com camadas de resina epóxi. Essa disposição pode afetar as propriedades mecânicas finais dos compósitos, pois pode influenciar na distribuição de tensões e no alinhamento das fibras. A disposição utilizada em cada um dos compósitos é ilustrada na [Figura 31](#).

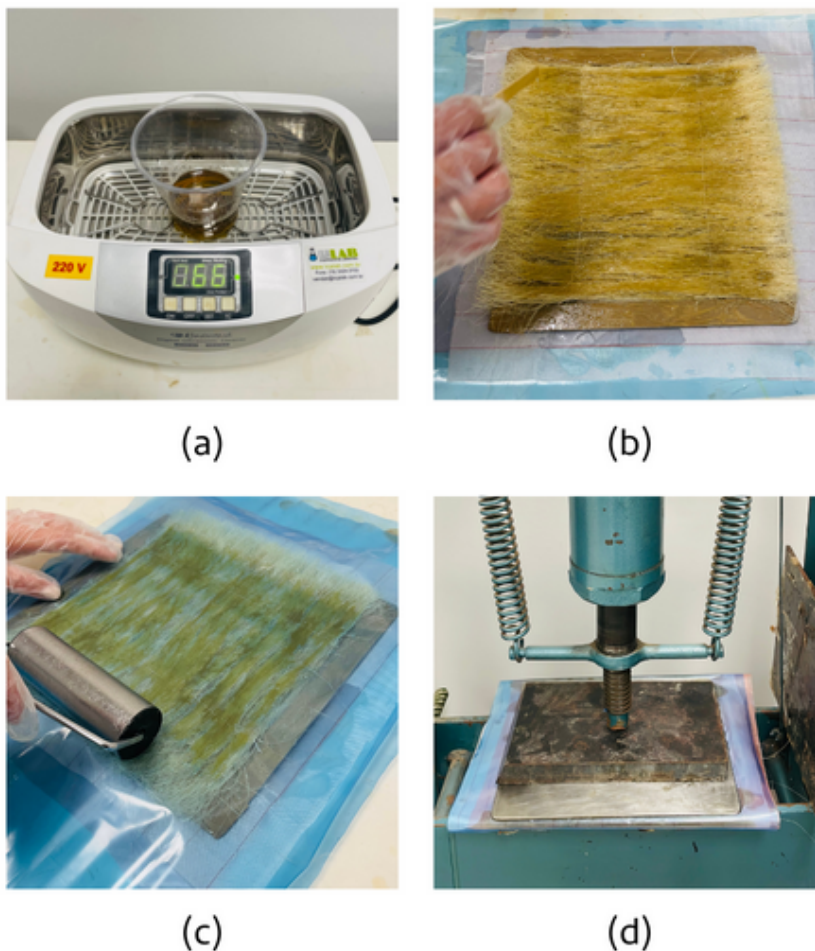
Figura 31 – Esquemático da composição de camadas dos compósitos: (a) Compósito sintético. (b) Compósito natural. (c) Compósito híbrido.



Fonte: Adaptado de ([JUNIOR, 2019](#)).

A fabricação das amostras começa com a preparação da solução matriz, que consiste na mistura da resina epóxi com o endurecedor, nas proporções recomendadas pelo fabricante, 100:23 (resina: endurecedor). Ao misturar os dois componentes, é comum surgirem bolhas, no entanto, essas bolhas podem afetar a qualidade final do compósito. Para evitar isso, a mistura foi submetida a um banho ultrassônico de 180 segundos para dissolver essas bolhas – [Figura 32](#) (a).

Figura 32 – Etapas para a obtenção dos compósitos: (a) Banho ultrassônico da resina. (b) Processo manual. (c) Finalização com rolo compressor. (d) Cura por compressão.



Fonte: De autoria própria.

A segunda etapa do processo de fabricação das amostras envolveu o uso de uma técnica manual de laminação (*hand lay-up*), com o uso de um molde retangular de dimensões 20 cm x 22 cm x 0,3 cm. O molde foi preparado com a sucessiva aplicação de filmes de polietileno, perfurado e de poliamida (*peel-ply*), conforme descrito na seção 2.2. Depois disso, o processo de fabricação foi iniciado com a alternância de camadas de resina epóxi (cerca de 121,44 gramas totais) e tecidos de fibras, de acordo com as quantidades de camadas descritas na Tabela 4 – Figura 32 (b). Para evitar espaços vazios e facilitar a disseminação da resina, foi utilizado rolo compressor em cada camada aplicada – Figura 32 (c). Adicionalmente, para fins de comparação, uma placa feita apenas de resina epóxi foi produzida com o mesmo molde. O processo de criação desta placa incluiu o derramamento da quantidade total de resina epóxi no molde, que antes foi revestido com filme polietileno.

Tabela 4 – Descrição de camadas de fibras e resina utilizadas na concepção dos corpos de prova.

Amostra	Camadas de fibras	Fração de volume em fibras	Camadas de resina epóxi	Espessura (mm)	Disposição das camadas
Compósito sintético	2 (vidro)	20%	3	3	Figura 31 (a)
Compósito natural	4 (sisal)	20%	5	3	Figura 31 (b)
Compósito híbrido	2 (sisal) + 1 (vidro)	10% (sisal) + 10% (vidro)	4	3	Figura 31 (c)
Resina epóxi	0	0	1	3	100% de resina epóxi

Para finalizar, dar acabamento e auxiliar no desmolde, o conjunto foi revestido com um tecido de poliamida, um filme perfurado e um filme de polietileno. Por fim, para a cura a temperatura ambiente, o compósito foi colocado em uma prensa hidráulica com uma carga de 5 tnf aplicada por 24 horas. Apenas a placa de resina epóxi pura não foi submetida à cura sob compressão, somente à cura ambiente. Esses processos são ilustrados na Figura 32 (d).

Uma vez que o compósito tenha curado, o conjunto da placa é retirado da prensa e do molde, para posterior processo de pós-cura. Todas as placas de compósitos e de resina epóxi pura foram submetidas a esse processo na estufa a 100 °C por cerca de 4 horas, essa técnica é realizada para consolidar as ligações cruzadas da resina epóxi (ZARGISKI et al., 2018).

3.3 Cálculo de Vazios

Para avaliar a qualidade dos compósitos fabricados, foi calculada a fração de espaços vazios (V_{fr}) para cada um deles, utilizando a equação 3.1 (GALLI, 2016).

$$V_{fr} = \frac{\rho_t - \rho_r}{\rho_t} \quad (3.1)$$

O valor teórico de densidade (ρ_t) dos compósitos foi calculado com base na equação 3.2, levando em conta as frações de peso de 80% para a matriz (Fp_{matriz}) e 20% para as

fibras (Fp_{fibra}). A densidade real dos materiais (ρ_r) foi determinada por meio de cálculos aproximados com base no volume (V_r) e peso (m_r) das amostras extraídas após o processo de pós-cura, utilizando a equação 3.3 (GALLI, 2016).

$$\rho_t = \frac{1}{\frac{Fp_{fibra}}{\rho_{fibra}} + \frac{Fp_{matriz}}{\rho_{matriz}}} \quad (3.2)$$

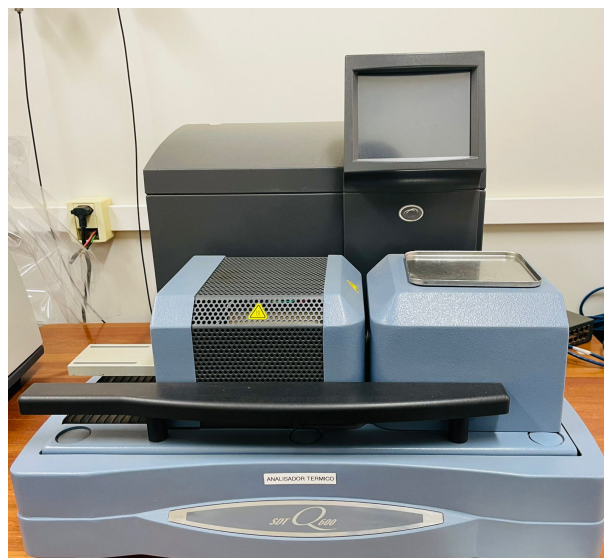
$$\rho_r = \frac{m_r}{V_r} \quad (3.3)$$

3.4 Análise das Propriedades Térmicas

Durante o processo de fabricação dos corpos de provas, amostras foram retiradas antes da cura e após a pós-cura para serem analisadas quanto às suas propriedades térmicas através de análises termogravimétrica (TGA) e de calorimetria exploratória diferencial (DSC). Esses ensaios foram realizados simultaneamente no equipamento SDT Q600 (TA Instruments) do Laboratório de Análise Instrumental na Universidade de Brasília, Faculdade Gama.

Aproximadamente 10 mg de amostra foram adicionadas ao cadinho de alumina e então cobertos. O aquecimento da amostra foi iniciado em uma atmosfera de nitrogênio (N_2), começando em temperatura ambiente e alcançando 600 °C, onde a taxa de aquecimento da análise é de 10 °C/min e a taxa de fluxo do gás nitrogênio é de 50 mL/min. Este processo foi realizado para todos os compósitos e após conclusão, os resultados experimentais e os gráficos foram obtidos com o auxílio do *software* Origin.

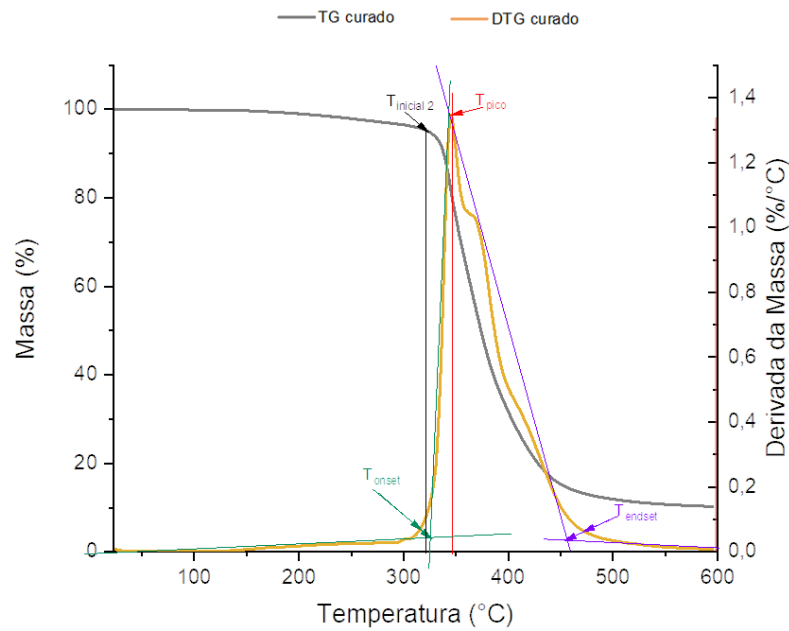
Figura 33 – Analisador térmico da TAINstruments.



Fonte: De autoria própria.

Os parâmetros de temperatura de estabilidade ($T_{inicial}$), temperaturas de início (T_{onset}) e final de decomposição (T_{endset}), bem como a temperatura do pico DTG (T_{pico}) e as etapas de decomposição com maior precisão são extraídos das curvas TG e DTG, conforme o exemplo ilustrado na Figura 35.

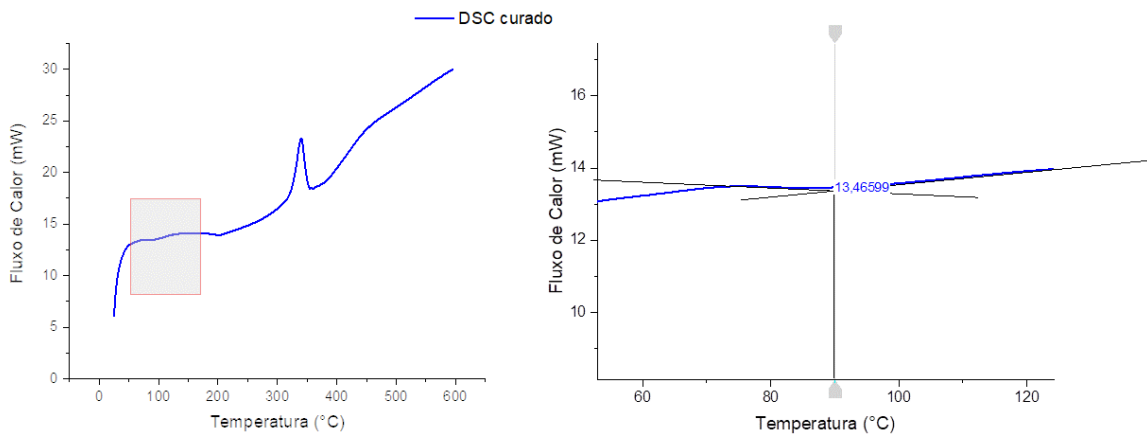
Figura 34 – Parâmetros extraídos das curvas DTG e TG.



Fonte: De autoria própria.

Enquanto as temperaturas de transição vítrea do material são extraídas das curvas DSC, conforme ilustra a figura abaixo:

Figura 35 – Temperatura de transição vítrea extraída das curvas DSC.

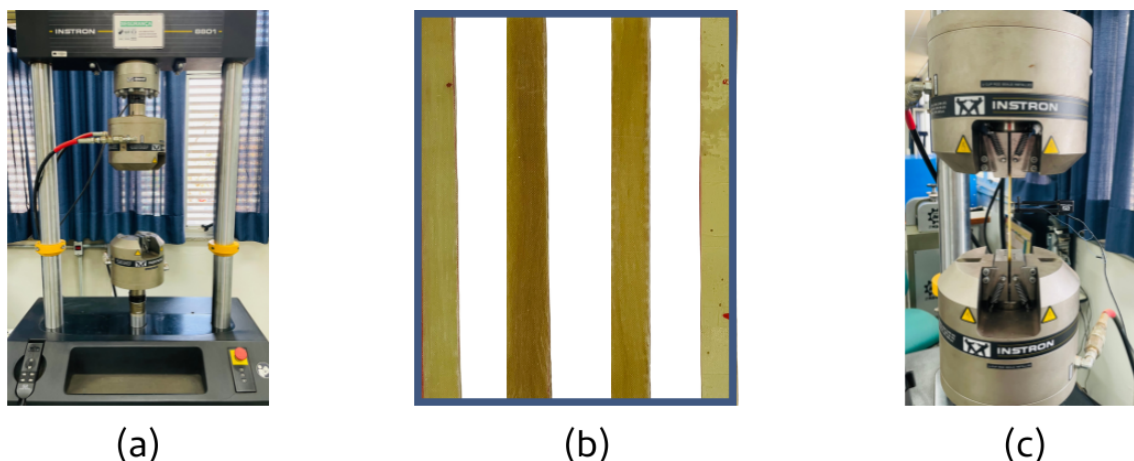


Fonte: De autoria própria.

3.5 Ensaio de Tração

De acordo com a norma ASTM D3039, foram realizados testes de tração em 6 amostras iguais de cada tipo de compósito. Esses ensaios foram realizados no equipamento universal servo-hidráulico modelo 8801 (INSTRON), disponível na FGA (UnB), no Laboratório de Materiais – Figura 36 (a). O equipamento tem capacidade de força mínima e máxima de intervalo de força mínima e máxima de 1 kN - 100 kN e a pressão das garras que seguram as extremidades das amostras é de 1 MPa. Além disso, foi utilizado um extensômetro de modelo 2026 (INSTRON) para garantir precisão nos resultados, esse equipamento tem abertura de 5 mm e atinge cerca de 40% de deformação e comprimento de medição de 12,5 mm.

Figura 36 – (a) Máquina universal de testes da marca Instron. (b) Amostras de corpos de provas. (c) Corpo de prova sendo ensaiado.



Fonte: De autoria própria.

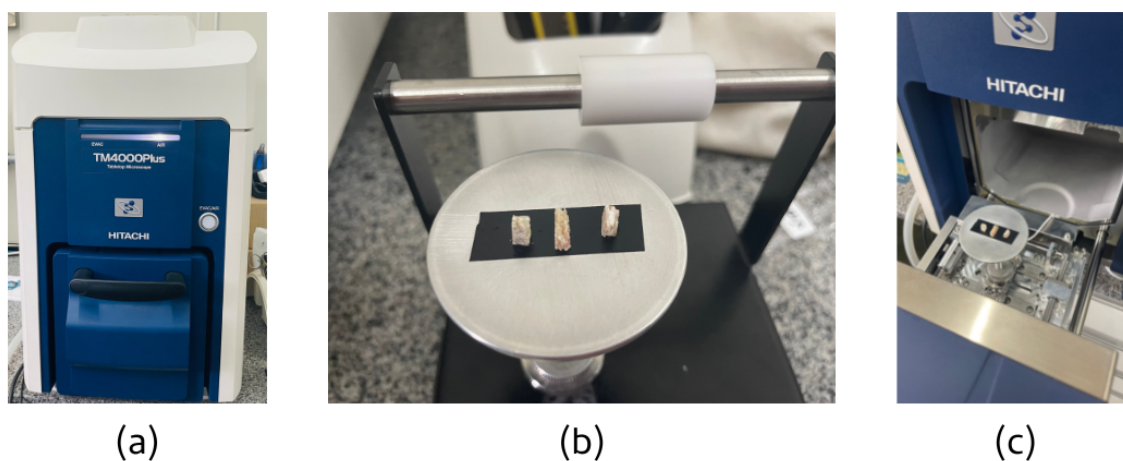
Os corpos de prova submetidos aos ensaios foram cortados com dimensões de 200 x 20 x 3 mm através de uma guilhotina – Figura 36 (b). Em seguida, foram fixados nas garras da máquina de ensaio e conectados ao extensômetro. Durante o ensaio, foram aplicadas cargas entre 1 kN - 7 kN com velocidade de 0,5 mm/min, esses parâmetros foram definidos baseados em estudos realizados recentemente (BATISTA, 2022) (TEIXEIRA, 2019).

Os resultados experimentais referentes as forças aplicadas e aos deslocamentos, fornecidos pelo *software* Bluehill, foram tratados de acordo com as equações descritas na seção 2.5.1. Enquanto os valores de limite de resistência à tração, deformação e os gráficos tensão-deformação foram adquiridos com auxílio do *software* Origin.

3.6 Análise da Fratura

Após o teste de tração, as superfícies fraturadas das amostras foram retiradas para análise morfológica – Figura 37 (b) – e fixadas em suporte com o auxílio de fita de carbono. Essa análise foi realizada através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) usando o equipamento HITACHI TM400 – Figura 37 (a) – presente no Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do IBAMA. Durante a análise, o equipamento operou com tensão de aceleração de 15 kV e utilizou sinais de imagem baseados em elétrons retro-espalhados e elétrons secundários. As micrografias foram obtidas com ampliações de 100, 300 e 500 vezes.

Figura 37 – (a) Microscópio eletrônico de varredura. (b) Amostras das regiões fraturadas dos compósitos. (c) Análise.



Fonte: De autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo conta com os resultados e as principais discussões quanto à qualidade final dos compósitos, bem como os resultados experimentais e numéricos relacionados à cada configuração de material.

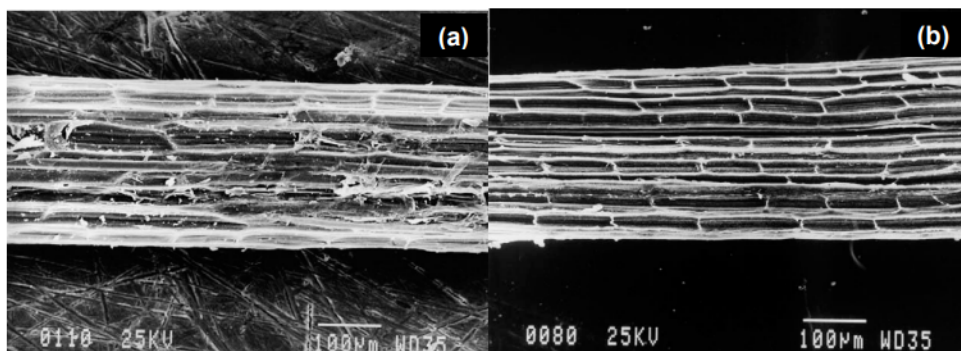
4.1 Qualidade Final dos Compósitos obtidos por Laminação Manual

Para verificar a qualidade final dos compósitos fabricados utilizando a laminação manual, foram apresentadas considerações referentes a estudos que envolveram o tratamento químico das fibras de sisal e realizados os cálculos teóricos dos espaços vazios, conforme descrito na seção 3.3.

4.1.1 Tratamento Químico das Fibras Naturais

O tratamento químico das fibras de sisal em solução de hidróxido de sódio tem sido amplamente utilizado para a melhora da adesão entre as fibras de sisal e uma matriz polimérica. No presente trabalho, foram consideradas as comprovações anteriores quanto à eficácia do tratamento, para a escolha do tipo de solução. Dessa forma, não foram realizadas análises das fibras de sisal tratadas e não tratadas, no entanto, vale ressaltar que o processo consistiu na remoção da hemicelulose e da lignina presente nas fibras naturais, além da ativação dos grupos hidroxilas presentes na celulose e do rompimento das ligações de hidrogênio, por consequência, melhorando a adesão entre a fibra e a matriz (SILVA, 2020) (ALBINANTE; PACHECO; VISCONTE, 2013).

Figura 38 – Análise microscópica da superfície das fibras de sisal: (a) *In natura*. (b) Tratada quimicamente em solução de hidróxido de sódio.

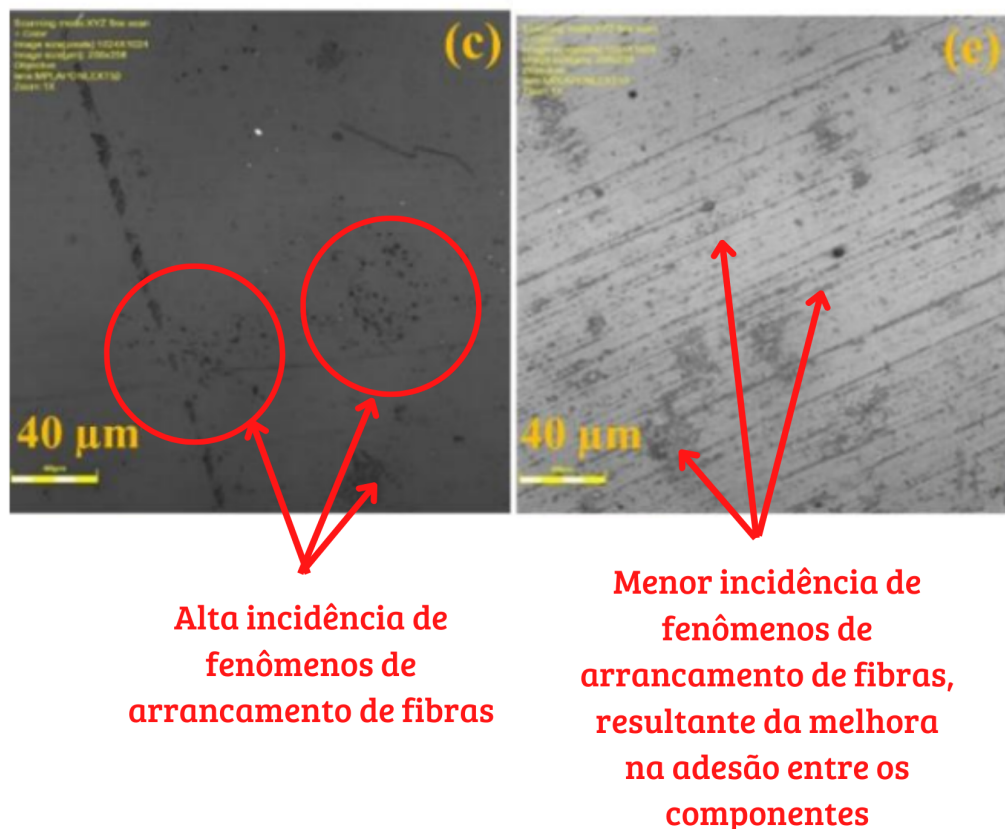


Fonte: (MORAES, 2010).

A Figura 38 apresenta a morfologia das fibras de sisal *in natura* e tratadas quimicamente em uma solução de 5% (m/v) de hidróxido de sódio (NaOH). Nessas micrografias observa-se que a fibra antes do tratamento, detêm de feixes de fibras unidos e ligados aos componentes de hemicelulose e lignina, que apresentam esse aspecto diferente dos feixes de fibras (TEODORO et al., 2011). Após o tratamento, a fibra apresenta uma superfície com maior rugosidade, onde boa parte desses componentes, que se encontravam em volta das fibras, foram removidos, promovendo um aumento da cristalinidade das fibras, uma atenuação no seu caráter hidrofílico e por isso, acarretando em uma melhora no contato das fibras com a matriz e conseqüentemente em sua adesão (SILVA, 2020).

A Figura 39 ilustra a microscopia da superfície de compósitos reforçados com fibras *in natura* e tratadas quimicamente com NaOH, onde é possível perceber que ambas apresentam fenômenos referentes a adesão entre os componentes. No entanto, o compósito fabricado com fibras tratadas apresenta uma menor incidência de fenômenos de arrancamento e deslocamento de fibras, evidenciando uma melhor adesão entre a fibra e a matriz (BATISTA, 2022).

Figura 39 – Análise microscópica do compósito epóxi/sisal unidirecional: (c) Fibras sem tratamento. (e) Fibras tratadas em solução de hidróxido de sódio.



Fonte: (BATISTA, 2022).

4.1.2 Análise de Vazios

Quanto a análise de espaços vazios, os resultados estimados encontram-se ilustrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Porcentagem de volume vazio nos compósitos e na placa de resina epóxi pura.

Compósito	Densidade teórica (kg/cm^3)	Densidade real (kg/cm^3)	Espessura média (mm)	Volume em vazios (%)
Sintético	1,29	1,23	$3,02 \pm 0,017$	4,65
Natural	1,20	1,18	$3,01 \pm 0,01$	1,30
Híbrido	1,24	1,21	$3,008 \pm 0,011$	2,42
Epóxi pura	1,15	1,11	$3 \pm 0,01$	3,48

Normalmente o teor de vazios é provocado por conta da liberação de voláteis, possíveis perdas de resina durante os processos de cura e pós-cura, devido a presença de bolhas durante o processo de fabricação, que eventualmente não foram totalmente desfeitas no banho ultrassônico da mistura resina e endurecedor ou pelo processo de compressão do conjunto de tecidos de fibras impregnados com resina (SILVA, 2020). Aqui, por se tratar de uma confecção manual e apesar de estar dentro de um intervalo considerável, resultado de processos de fabricação e tratamento químico eficientes, todos os compósitos apresentaram uma porcentagem de espaços vazios.

O compósito sintético evidenciou a maior porcentagem em volume de vazios com cerca de 4,65%, essa porcentagem encontra-se dentro do esperado ao ser comparada com estudos realizados recentemente e utilizando do mesmo processo de fabricação (3,98%). O compósito natural apresentou o menor dos valores para espaços vazios, aproximadamente 1,30%, entregando uma redução de 69,2% com estudos semelhantes realizados (4,22%).

Uma possível solução para uma diminuição quanto a quantidade de espaços vazios, seria a utilização do processo da fabricação manual que consiste de uma cura em uma bolsa de vácuo (*vacuum bag*), essa técnica tem sido amplamente utilizada para obtenção de peças de aeronaves, uma vez que trata-se de um processo de baixo custo, normalmente utilizando um elevado teor de fibras e que apresenta baixa porcentagem em espaços vazios (APPELT, 2019).

4.2 Caracterização dos Materiais por Análise Térmica

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das análises de termogravimétrica (TGA) e calorimetria diferencial de varredura (DSC), realizadas para investigar as propriedades térmicas dos compósitos. Os dados incluem as temperaturas obtidas, os parâmetros de perda de massa, o grau de cura da resina epóxi, e as curvas TG, DTG e DSC.

4.2.1 Termogravimetria (TGA)

Diante disso, os dados de temperaturas e porcentagem de perda de massa resultantes são listados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados da análise termogravimétrica.

Compósito	T_{onset} (°C)	T_{pico} (°C)	T_{endset} (°C)	$T_{inicial}$ (°C)	Perda de massa a 600°C (%)
Sintético não curado	309,92	341,42	492,19	313,03	91,92
Sintético curado	306,90	337,56	458,50	308,41	85,76
Natural não curado	310,76	341,11	478,08	323,07	91,81
Natural curado	300,63	366,21	458,83	305,40	86,44
Híbrido não curado	307,14	352,83	470,18	315,91	82,36
Híbrido curado	297,34	355,98	460,37	303,03	68,55
Epóxi pura não curada	319,1	345,24	461,61	323,66	92,08
Epóxi pura curada	318,26	346,04	470,10	326,70	89,72

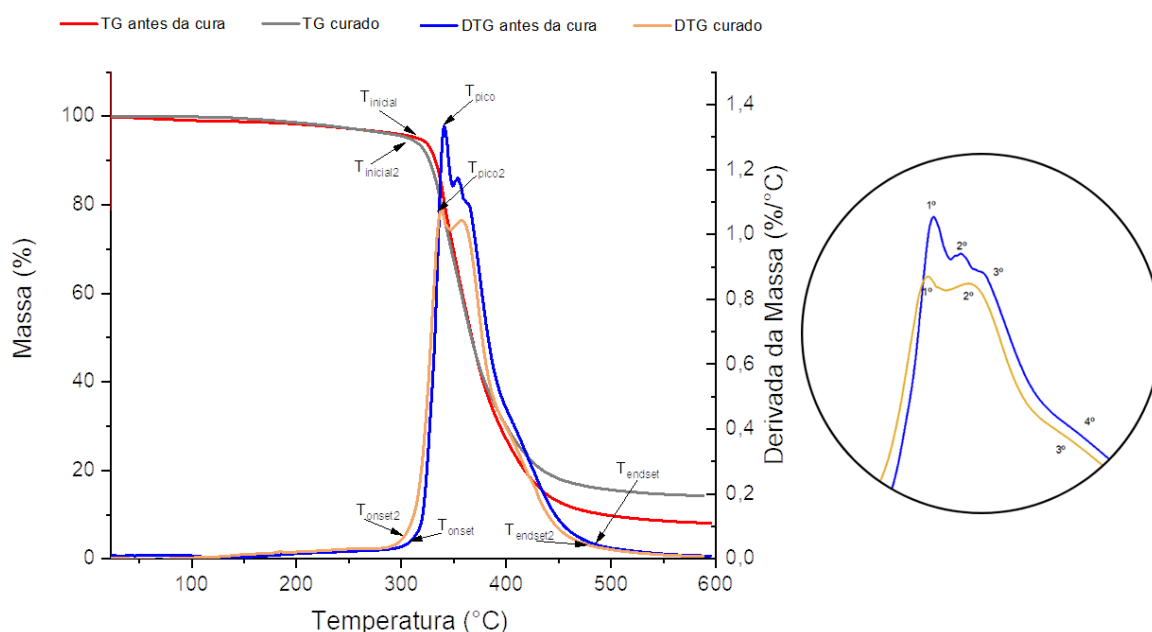


Figura 40 – Curvas TG e DTG para o compósito sintético

As curvas TG e DTG dos compósitos reforçados com fibras de vidro, mostradas na Figura 40, apresentam quatro estágios de decomposição antes da cura. Esses estágios incluem a remoção de possível umidade contida na fibra, a eliminação de moléculas de baixa massa molecular presente na mistura resina-endurecedor, a decomposição da resina e a decomposição da fibra de vidro. Após a cura, esses compósitos apresentam apenas três etapas de decomposição, eliminando a primeira etapa referente à remoção de umidade e

moléculas de baixa massa molecular. É importante notar que, como em todos os compósitos, houve uma diminuição na perda de massa ao final da análise após a cura (85,76%). Isso é devido à evaporação dos monômeros e subprodutos da reação de polimerização, que são removidos durante o processo de cura. Além disso, a cura da resina envolve a formação de ligações covalentes entre os monômeros, o que resulta em uma estrutura molecular mais rígida e estável. No caso do compósito sintético, esses compósitos apresentam uma alta temperatura de estabilidade térmica (308,41 °C), além das temperaturas de decomposição final (458,50 °C) e de pico máximo de degradação (337,56 °C) inferiores, em comparação com os demais compósitos e a resina pura. Isso é devido à maior resistência às altas temperaturas das fibras de vidro e a alta rede de ligações cruzadas formada durante o processo de cura da resina (OTTOLINI, 2019).

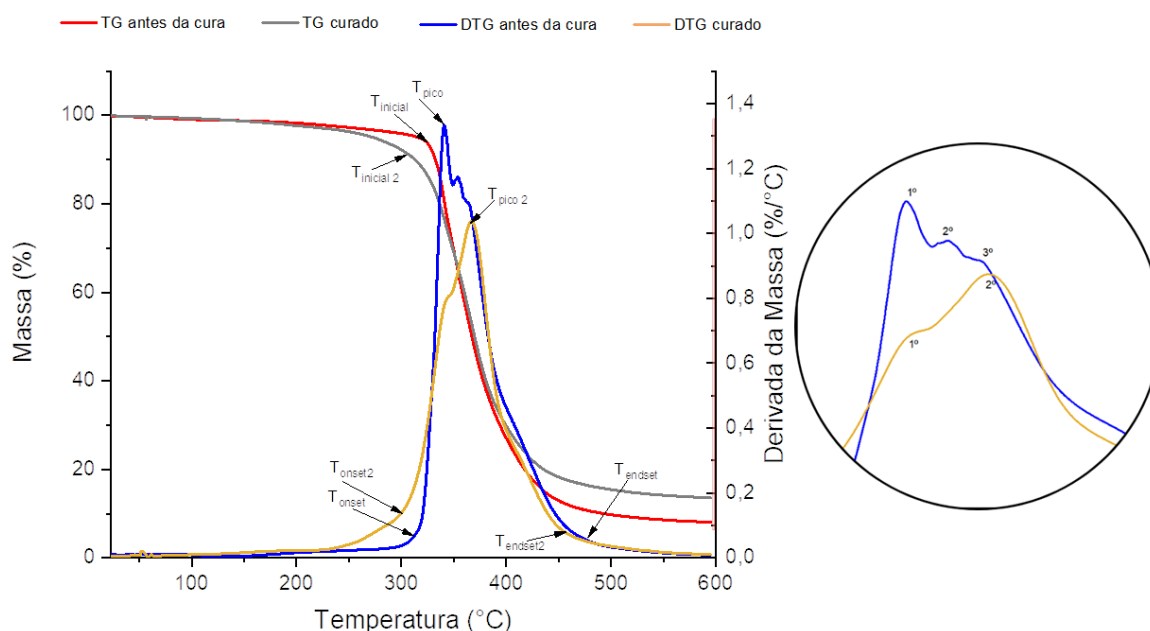


Figura 41 – Curvas TG e DTG para o compósito natural.

Conforme mencionado anteriormente, as fibras utilizadas para a manufatura do compósito natural foram tratadas quimicamente com NaOH (mercerização). Então, tendo em vista as curvas TG e DTG dos compósitos reforçados com fibras de sisal dispostas na Figura 41, temos que o efeito das fibras tratadas quimicamente sobre os compósitos curados ou não curados. Antes da cura, esses compósitos não mostram o pico característico relacionado a decomposição da hemicelulose, pois a fibra foi tratada quimicamente e essa etapa é removida, conforme observado por (SANTOS et al., 2017). Em vez disso, as etapas de degradação envolvem a perda de moléculas de água retidas pelas fibras de sisal, já que o tratamento químico e a secagem, não removem completamente essas moléculas. O pico máximo (341,11 °C) corresponde à decomposição das ligações da celulose e da resina

epóxi, onde o deslocamento desse pico é característico da concentração homogênea de celulose, após o tratamento químico realizado em solução de hidróxido de sódio (BENINI, 2011). As outras etapas ocorrem lentamente e são resultantes da decomposição total da amostra e dos componentes restantes de lignina presentes nas fibras naturais.

Depois da cura, a curva DTG apresenta duas etapas de reações, mas como esperado, com menor valor para a perda de massa (86,44%) e temperatura do pico máximo de 366,21 °C, pois trata-se de um material curado e com temperatura de estabilidade de 305,40 °C. Isso ocorre devido a melhor adesão entre os componentes e aumento de sua rede reticular, conseqüentemente de estabilidade térmica e da resistência mecânica do material (KNEIPP et al., 2019).

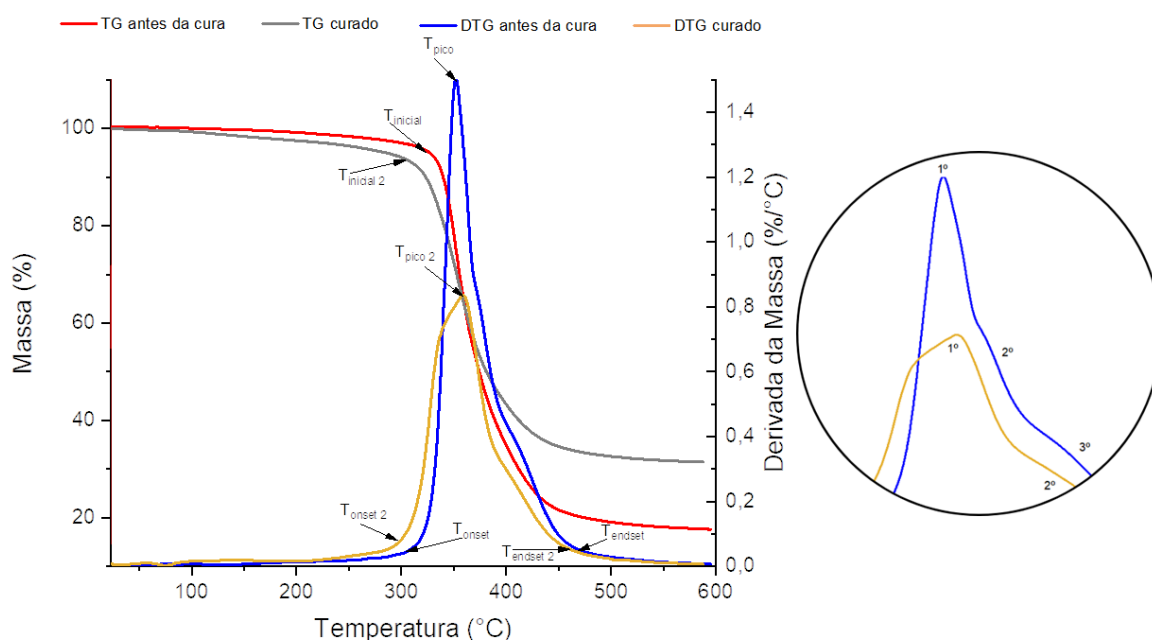


Figura 42 – Curvas TG e DTG para o compósito híbrido.

Quanto ao compósito híbrido, onde suas curvas TG e DTG encontram-se ilustradas na Figura 42, observou-se algumas características específicas em relação aos compósitos reforçados com fibras únicas. Antes e depois da cura, esses compósitos apresentam altas temperaturas de estabilidade térmica (315,91 °C e 303,03 °C) devido à combinação de fibras naturais e de vidro. Três etapas de degradação são observadas, a primeira delas é resultado da eliminação da umidade absorvida pelas fibras. O pico máximo (352,83 °C) é resultado da degradação da celulose presente nas fibras naturais e da resina epóxi. As demais etapas envolvem a decomposição total das fibras de vidro, que são resistentes devido à sua alta resistência térmica comparada com as fibras naturais, da resina epóxi e da lignina que não teve sua composição totalmente extinta após o tratamento químico

das fibras naturais.

Após a cura, esses compósitos apresentam duas etapas de degradação, além de terem de valores inferiores para a perda de massa (68,55%) ao final da análise (a 600 °C). Esse comportamento é dado por se tratar de materiais curados, onde durante o processo de cura, as resinas são polimerizadas e as fibras são aderidas à resina, formando ligações cruzadas. Essas ligações cruzadas são responsáveis pela melhoria da estabilidade térmica e mecânica do compósito. Isto é, a relação entre a temperatura de estabilidade, perda de massa ao final da análise térmica e o processo de cura estão diretamente associados com a formação de ligações cruzadas (SILVA, 2019).

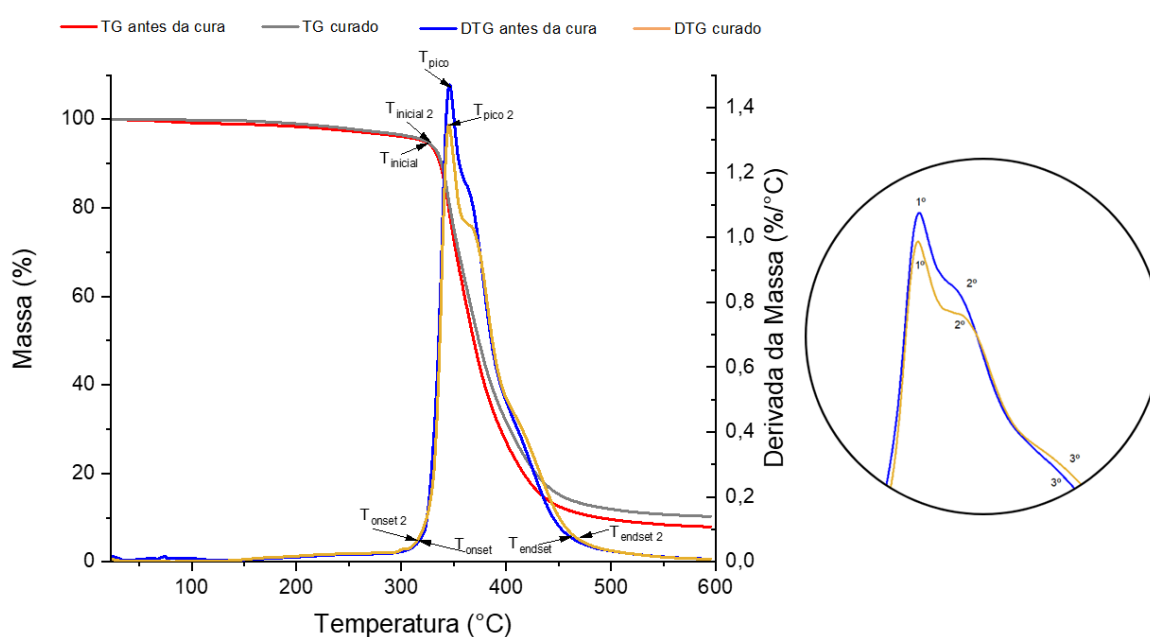


Figura 43 – Curvas TG e DTG para a resina epóxi pura.

Finalmente, ao analisar a resina epóxi pura – Figura 43 –, notamos que as curvas exibem um pico máximo (345,24 °C) na análise TGA, relacionado à evaporação de solventes presentes na resina e duas reações sobrepostas logo em seguida. Após a cura, a resina exibe uma configuração de picos semelhante ao processo anterior à cura, com valor para temperatura de degradação máxima igual a 346,04 °C. As primeiras etapas de degradação são relacionados à decomposição de impurezas presentes na resina e grupos funcionais que não reagiram durante o processo de cura da resina, enquanto a decomposição da estrutura principal da resina só ocorre durante o pico final.

A análise dos resultados mostrou que os compósitos híbridos apresentaram as menores perdas de massa (68,55%), além de terem de altas temperaturas de estabilidade térmica e conseqüentemente, resistência à decomposição. Isso foi observado tanto nas

amostras não curadas (315,91 °C) quanto nas amostras avaliadas após a pós-cura (303,03 °C). No entanto, a adição de fibras de sisal resultou em uma diminuição nas temperaturas de início, máximo e final de degradação dos compósitos, o que pode ser explicado pelo menor grau de aderência entre as fibras e a resina. Em geral, apesar do comportamento térmico dos compósitos híbridos, ainda sim, os resultados indicam que os compósitos sintéticos são os materiais mais resistentes à degradação térmica (308,41 °C) e podem ser utilizados em aplicações onde se exige resistências térmicas.

4.2.2 Caracterização por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

O DSC é uma técnica utilizada para avaliar a quantidade de calor liberado ou absorvido durante a cura de resinas epóxi reforçadas com fibras. Essa análise é capaz de determinar a entalpia de reação (ΔH), bem como o grau de cura do material (α_{cura}) e a temperatura de transição vítrea (T_g). A Figura 44 mostra os resultados da análise DSC para os diferentes compósitos, enquanto a Tabela 7 expõe dados como a temperatura de transição vítrea, a entalpia de reação e o grau de cura da amostra.

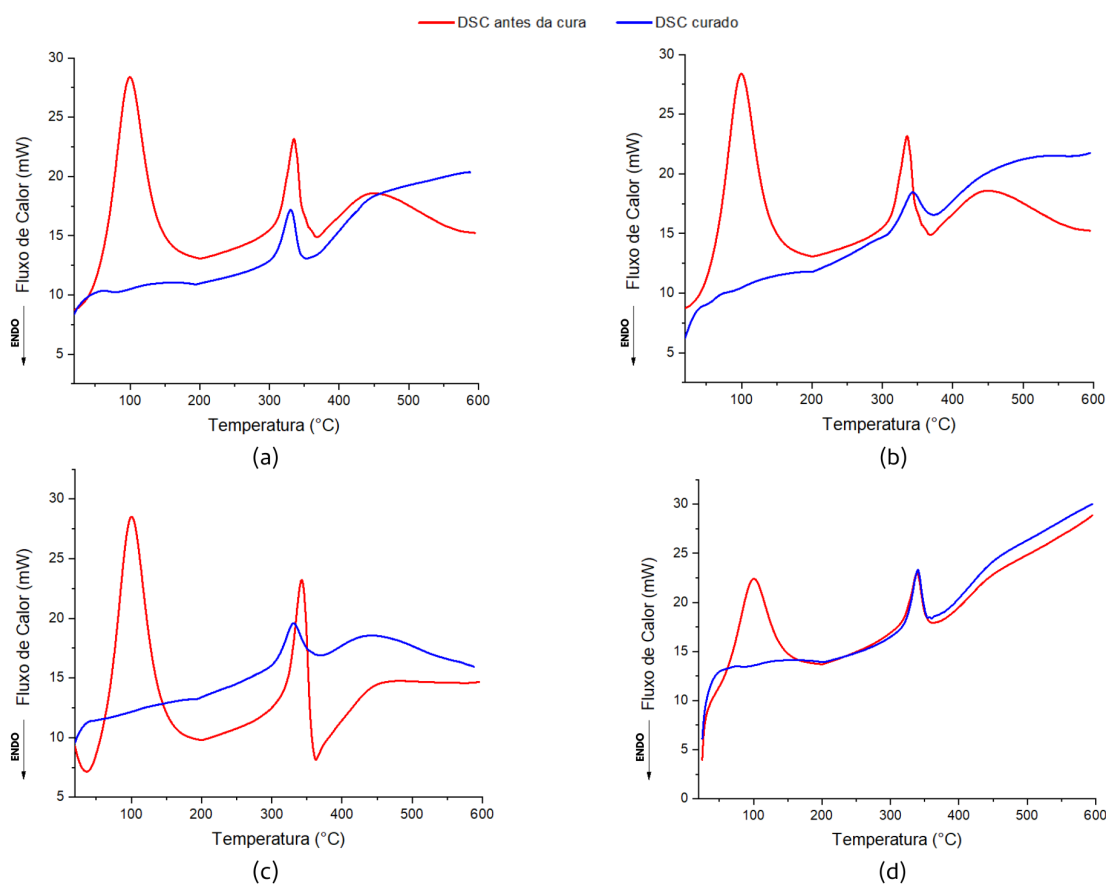


Figura 44 – Curvas DSC: (a) Compósitos sintéticos. (b) Compósitos naturais. (c) Compósitos híbridos. (d) Resina epóxi pura.

Tabela 7 – Resultados da análise de calorimetria exploratória diferencial.

Compósito	T_g ($^{\circ}C$)	ΔH (J/g)	α_{cura} (%)
Sintético não curado	58,24	409,26	0
Sintético curado	94,86	26,10	93,62
Natural não curado	59,78	309,69	0
Natural curado	63,71	32,93	89,37
Híbrido não curado	60,94	304,96	0
Híbrido curado	68,39	5,35	98,25
Epóxi pura não curada	64,33	259,28	0
Epóxi pura curada	67,59	35,90	86,15

Analisando as curvas DSC para os compósitos sintéticos, naturais, híbridos e a resina epóxi pura, antes e depois dos procedimentos de cura, é possível notar a extinção de um primeiro pico exotérmico. Este comportamento é característico da reação química da cura que forma ligações cruzadas, resultando numa estrutura molecular mais rígida e estável, e aumentando a resistência à degradação térmica do material e conseqüentemente sua temperatura de transição vítrea (SILVA, 2020). Ao avaliar as curvas DSC antes da cura, observa-se um pico exotérmico (liberação de calor) associado à remoção de umidade e moléculas de baixa massa molecular, seguido do pico refere a decomposição da resina e das fibras.

Portanto, para as amostras em geral, antes do processo de cura, as curvas DSC apresentam dois picos exotérmicos, referentes a liberação de calor devido às reações químicas ocorrendo na resina e a degradação da resina epóxi e das fibras utilizadas como reforço. Além disso, é possível observar que a entalpia de reação é alta (409,26 J/g - 259,28 J/g), indicando uma baixa quantidade de ligações cruzadas. Após o processo de cura, com maior quantidade de ligações cruzadas e baixas entalpias de reações (35,90 J/g - 5,35 J/g), as curvas DSC apresentam apenas um pico exotérmico, associado à degradação dos componentes do compósito, visto que a etapa de eliminação de umidade e moléculas de baixa massa molecular foi concluída.

De forma complementar, as curvas DSC permitem a identificação da T_g do material através do primeiro desvio de linha base. A avaliação das temperaturas T_g também revela um aumento desse parâmetro após o processo de pós-cura, uma vez que durante a cura, as moléculas da resina se organizam e se ligam, o que pode afetar a estrutura do material e, conseqüentemente, sua temperatura de transição vítrea. Além disso, a cura da resina também pode aumentar a estabilidade térmica do material, o que pode levar a uma variação na temperatura de transição vítrea. A variação entre as temperaturas (ΔT) nas diferentes condições esteve entre 3,26 $^{\circ}C$ e 36,62 $^{\circ}C$, com a menor variação ocorrendo na resina epóxi pura e a maior nos compósitos sintéticos. Os resultados também mostram que os compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de vidro apresentam tempera-

turas de transição vítrea maiores depois do processo de cura da resina epóxi (94,86 °C). Quanto aos compósitos híbridos, estes apresentaram o maior grau de cura (98,25%) e conseqüentemente a menor energia de entalpia (5,35 J/g).

Em resumo, após o processo de cura, a temperatura de transição vítrea obteve um aumento considerável. De acordo com (SILVA, 2020), essa variação é consequência da dependência desses parâmetros ao grau de cura da reação. O aumento das ligações cruzadas durante a cura do material diminui a mobilidade das cadeias poliméricas e, como resultado, reduz as curvas exotérmicas e aumenta os valores para T_g .

4.3 Resistência à Tração e Análise da Fratura

Para avaliar o desempenho mecânico dos diferentes compósitos e da resina epóxi utilizada e validar, comparando com os resultados encontrados numericamente, foram realizados ensaios de tração em cinco corpos de prova para cada um dos objetos de estudo. Durante os ensaios, a maior parte das amostras falharam na região de estrição das amostras, visto que se trata do plano concentrador de tensão, resultando em rupturas ao centro do corpo de prova. Levando em consideração os resultados, foram determinadas as propriedades de tração média desses materiais, como limite de resistência à tração, módulo de elasticidade, deformação e resistência relativa, ilustradas na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades dos materiais sob tração.

Compósito	Limite de resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação (mm/mm)	Resistência relativa (MPa.cm ³ /g)
Sintético	189,09 ± 4,31	7,05 ± 0,28	4,66 ± 1,3	153,73 ± 3,36
Natural	84,89 ± 1,1	3,78 ± 0,35	3,71 ± 0,39	71,94 ± 0,93
Híbrido	144,34 ± 12,44	4,87 ± 0,58	4,31 ± 0,42	119,29 ± 10,28
Epóxi pura	62,15 ± 9,26	2,57 ± 0,25	4 ± 0,36	55,99 ± 8,34

Ao analisarmos as propriedades dos compósitos com relação à resina epóxi pura, observa-se um aumento quanto a resistência à tração, cerca de 36,59% para o compósito natural, 204,25% para o compósito sintético e 132,21% para o compósito híbrido. Conforme o reportado na literatura, esse aumento é dado pela adição das fibras, componente de maior influência quanto a resistência do compósito (LOPES, 2017). Entre os compósitos, a junção das fibras de vidro com as fibras de sisal resultou em um aumento significativo quanto ao limite de resistência à tração, isto é, quanto a essa propriedade o acréscimo das fibras sintéticas ao compósito natural resultou em um aumento superior a 70,03%.

Comparando as propriedades do compósito natural com pesquisa realizada recentemente, envolvendo compósitos reforçados com fibras de sisal alinhadas unidirecionalmente, – utilizando 30% do seu volume em fibras –, temos um limite de resistência a tração de 87,20 MPa, ou seja, diferença de cerca de 2,73%, provavelmente resultante do acréscimo de 10% em volume de fibras utilizadas (BATISTA, 2022). Além disso, a baixa porcentagem em espaços vazios dos compósitos naturais influenciou diretamente em uma melhora no desempenho mecânico desses materiais submetidos ao ensaio de tração, o que é visto ao comparar os limites de resistências à tração desses compósitos (84,89 MPa) com o limite de resistência apresentado pelo compósito, confeccionado em estudo recente, que deteve maior quantidade de espaços vazios (17 MPa) (TEIXEIRA, 2019) (BATISTA, 2022).

Para o compósito sintético (189,09 MPa), considerando estudo realizado em compósitos reforçados com fibras de vidro, – utilizando 30% do seu volume em fibras –, a nível de comparação, temos o limite de resistência a tração de 130,84 MPa, cerca de 30,8% abaixo do valor resultante dos ensaios realizados no compósito sintético, essa diferença provavelmente é dada pelos processos de fabricação realizados e pelo o tipo de resina epóxi utilizado no presente trabalho (LOPES et al., 2017).

Conforme o reportado na literatura, ao compararmos os resultados com estudos realizados em compósitos de resina poliéster reforçados com fibras sintéticas e naturais – utilizando 15% de volume em fibras de vidro e 10% em fibras de sisal – com resistência à tração de 80,2 MPa, isto é, os resultados do presente trabalho apresentaram um aumento superior a 80% (VOLTZ; SILVA, 2013). Esse aumento é dado pela utilização de uma resina com melhores propriedades mecânicas, resina epóxi DGEBA, normalmente aplicada em componentes que requerem alto desempenho. E pelo alinhamento das fibras, já que no estudo em questão foram utilizadas mantas de fibras de vidro dispostas aleatoriamente, enquanto o presente trabalho envolveu tecidos unidirecionais, por apresentarem o melhor desempenho mecânico para ensaios de tração (SUN; ADAMS; MILEIKO, 2007).

Utilizando a densidade real dos materiais (Tabela 5) para normalizar os resultados de resistência à tração, obtém-se a resistência relativa. Ao avaliar e comparar esses resultados entre os diferentes compósitos, observa-se a mesma relação de resistência, onde o compósito sintético ainda apresenta o maior valor quanto a esse parâmetro (153,73 MPa.cm³/g), seguido do compósito híbrido (119,29 MPa.cm³/g) e por fim, do compósito natural (71,94 MPa.cm³/g).

Para facilitar a observação do comportamento mecânico desses materiais quanto ao esforço de tração, baseado nos ensaios que obtiveram os resultados mais próximos das propriedades médias, as curvas de tensão-deformação para cada um dos compósitos foram traçadas, conforme o gráfico da Figura 45.

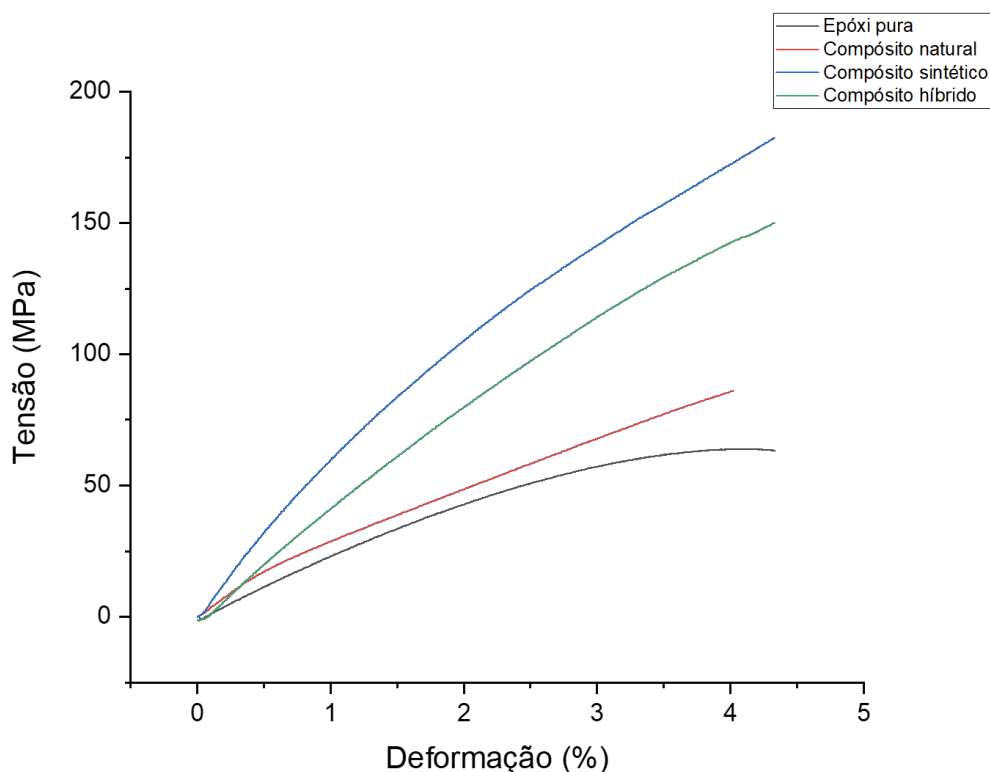


Figura 45 – Curvas tensão-deformação dos diferentes compósitos.

Avaliando as curvas tensão-deformação é perceptível que os compósitos híbridos e sintéticos apresentaram maiores deformações, se comparados com o compósito natural e com a resina epóxi pura. Esse comportamento era previsto, uma vez que as fibras de vidro são mais resistentes e podem suportar cargas mais elevadas, dessa forma, apresentando maior resistência à deformação e conseqüentemente maior capacidade de deformação máxima antes de sua ruptura. Além disso, observa-se que apesar do compósito sintético ainda manter o maior módulo de elasticidade (7,05 GPa), ao comparar o compósito natural (3,78 GPa) com o compósito híbrido (4,87 GPa), houve um aumento de cerca de 28,94% no módulo de elasticidade diante da adição das fibras de vidro.

Em síntese, com a finalidade de complementar a análise do desempenho mecânico desses materiais após os ensaios de tração, foi realizada a análise utilizando microscópio eletrônico de varredura (MEV) para avaliar as superfícies fraturadas dos compósitos e averiguar a qualidade do processo de fabricação. As [Figura 46](#), [Figura 47](#) e [Figura 48](#) dispõem das micrografias referentes aos compósitos sintéticos, naturais e híbridos, respectivamente.

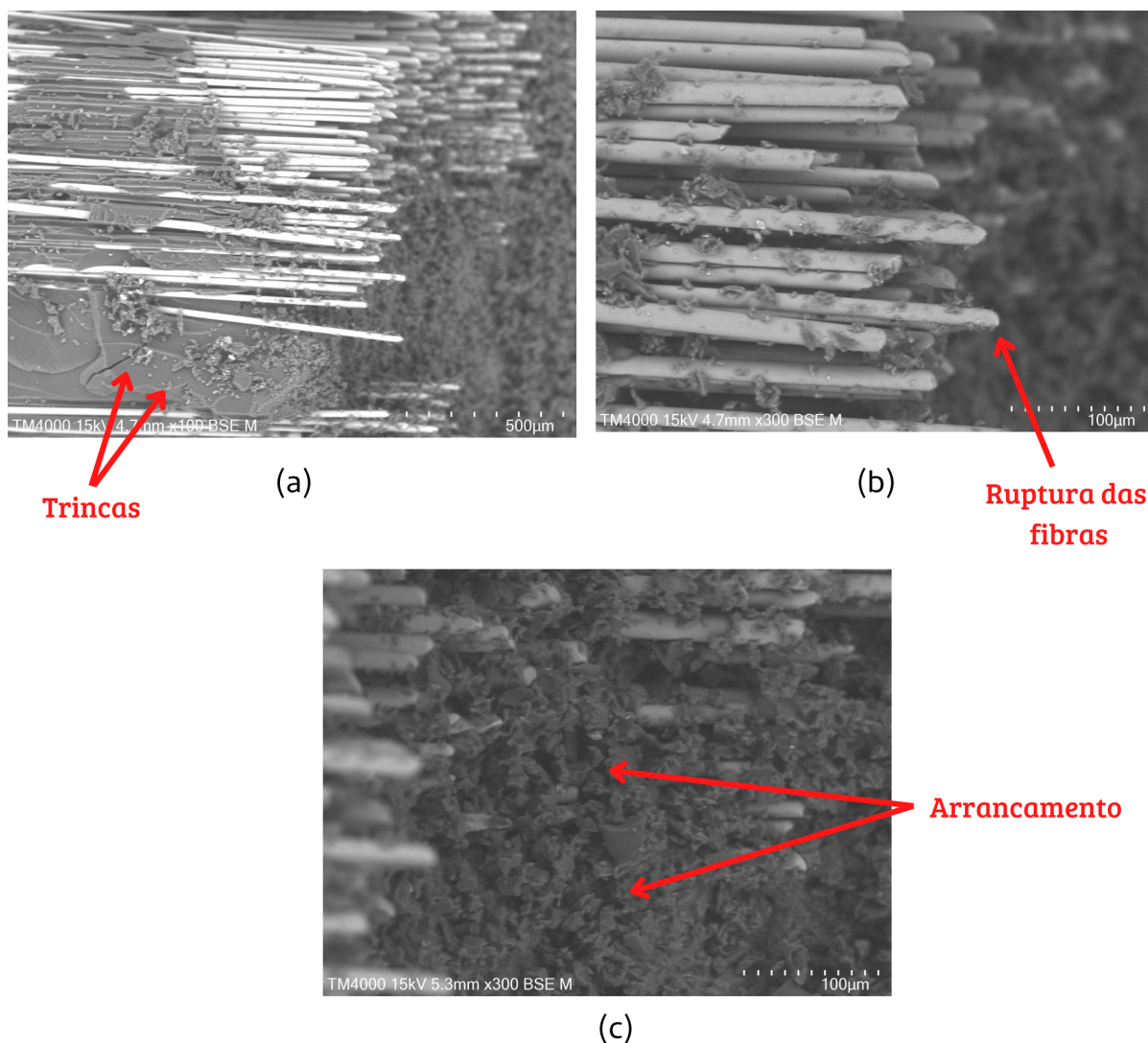


Figura 46 – Análise microscópica da superfície fraturada do compósito sintético: (a) 100x. (b) 300x. (c) 300x.

Examinando a [Figura 46](#), referente as micrografias da região fraturada do compósito sintético, é possível observar os danos causados pelo ensaio e que não há presença significativa de vazios nas amostras. Conforme o previsto pela literatura, a adição das fibras inorgânicas a resina epóxi resultou em um aumento quanto sua resistência mecânica, diante disso, a resina epóxi passou a suportar uma deformação plástica significativa, por isso seu aspecto granular ([HEARLE; LOMAS; COOKE, 1998](#)).

Observa-se que, iniciando-se na resina epóxi, a propagação de trincas prossegue até o encontro das fibras de vidro – [Figura 46](#) (a) – resultando em falhas como clivagens no plano perpendicular ao eixo da fibra e com angulações de 45° do eixo da fibra, decorrente da linha de tensão de cisalhamento máxima – [Figura 46](#) (b), além do aspecto granular da resina epóxi. Ademais, observa-se poucos fenômenos de arrancamento das fibras (*pull-out*) – [Figura 46](#) (c) –, mas que justificam os valores de resistência à tração inferiores aos

encontrados na literatura, uma vez que essa ocorrência está associada a baixa adesão entre a fibra e a matriz e conseqüentemente às propriedades mecânicas finais dos compósitos.

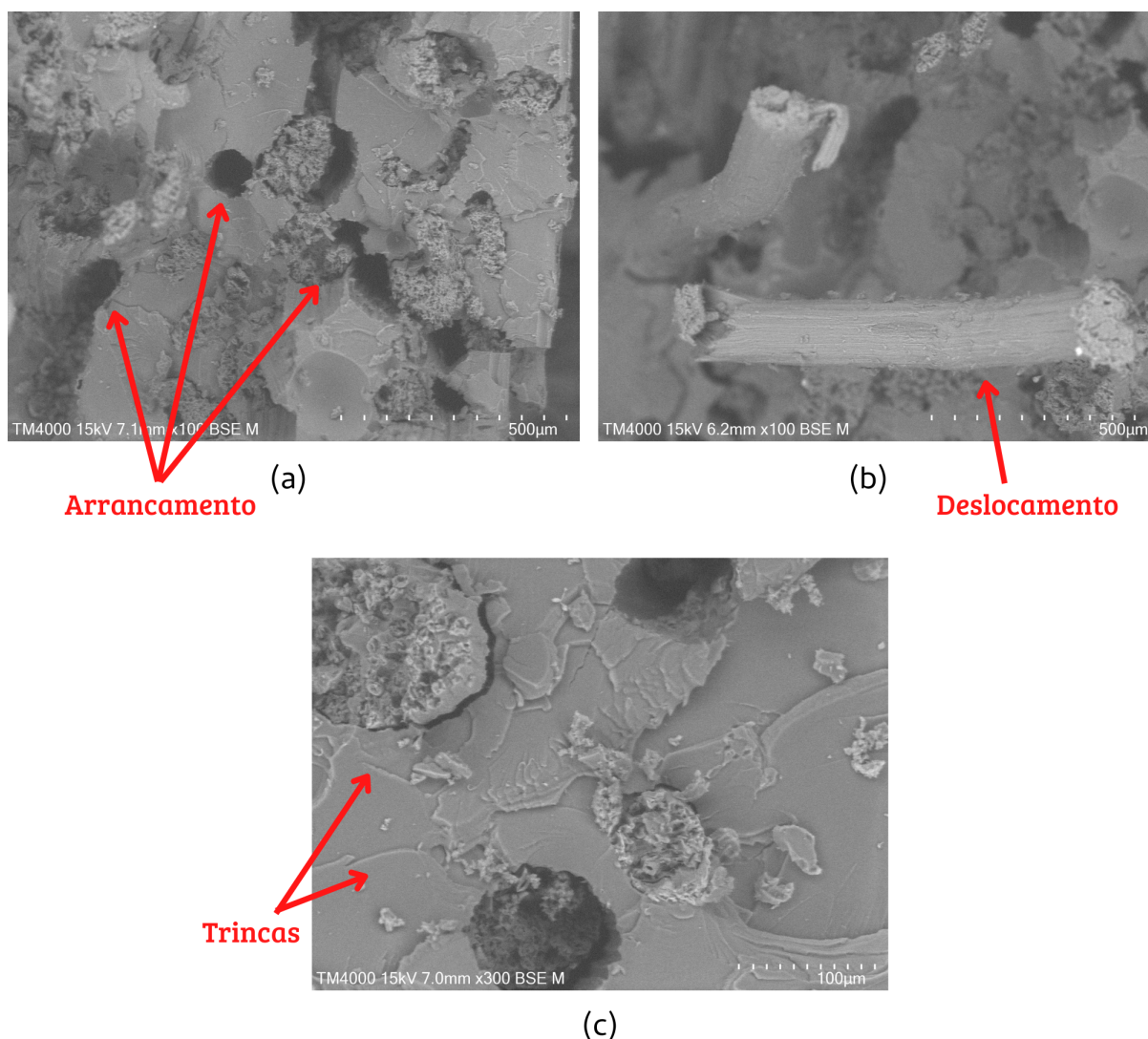


Figura 47 – Análise microscópica da superfície fraturada do compósito natural: (a) 100x. (b) 100x. (c) 300x.

Para o compósito reforçado com fibras de sisal – Figura 47 (a) e (b) – apesar do tratamento químico realizado em solução de hidróxido de sódio, também são observáveis fenômenos de arrancamento e deslocamento das fibras, decorrente da baixa adesão entre as fibras de sisal e a matriz. Esse comportamento é dado devido a baixa conformidade entre as fibras de sisal, majoritariamente apolar e a resina epóxi, que apresenta energia polar (ROSÁRIO et al., 2011). Quanto a matriz, é visível o início da ruptura decorrente das trincas – Figura 47 (c) – que se estenderam até atingir a interface das fibras.

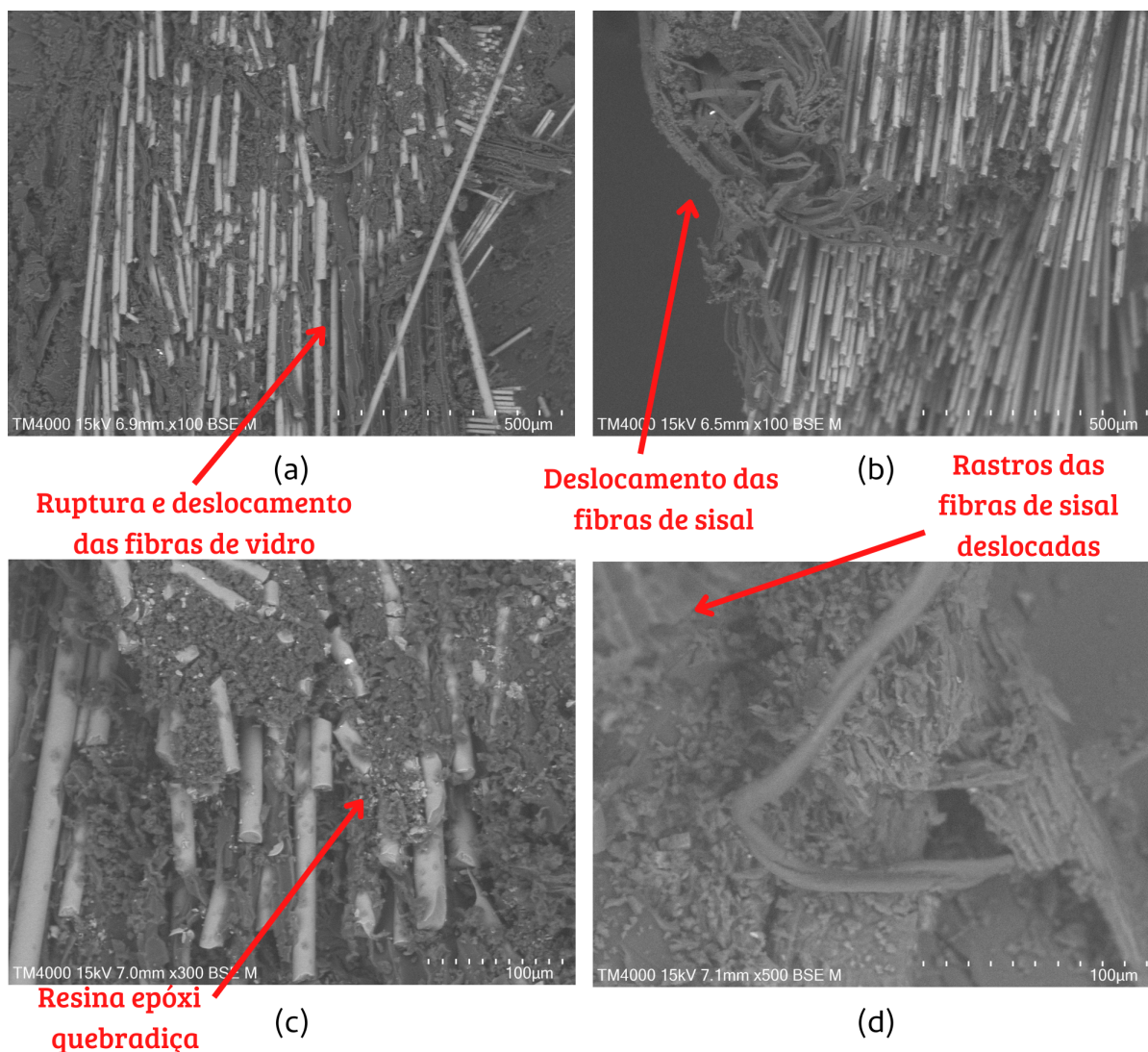


Figura 48 – Análise microscópica da superfície fraturada do compósito híbrido: (a) 100x. (b) 100x. (c) 300x. (d) 500x.

Por último, o compósito híbrido apresentou uma forte característica de dispersão das fibras após sua ruptura, onde as fibras de sisal obtiveram um maior grau, provavelmente decorrente da sua ruptura ter sido antecedida à ruptura das fibras de vidro, ou seja, houve a movimentação dessas fibras naturais rompidas durante o ensaio até que houvesse a falha do compósito – Figura 48 (b). Também foi observado o arrancamento dessas fibras de sisal, onde na micrografia da Figura 48 (d) pode-se observar o rastro deixado por esse feito. Comparando essa análise com pesquisa envolvendo compósitos poliméricos reforçados com fibras de sisal e de vidro, utilizando modelos unidirecionais, observou-se esse mesmo comportamento de dispersão significativa das fibras (SILVA, 2012).

Quanto as fibras de vidro, após sua ruptura acentuada em uma quebra plana e perpendicular ao eixo da fibra, também se constata a dispersão parcial das mesmas, decorrente da baixa adesão entre os componentes do compósito (HEARLE; LOMAS;

COOKE, 1998). Além disso, percebe-se o aspecto granular da matriz epóxi, resultante de sua fragilidade e da alta deformação suportada pelo compósito híbrido.

4.4 Resultados da Análise Numérica e Comparações

Foi realizada uma simulação numérica dos diferentes compósitos com o intuito de compará-los entre si e validar seus resultados por meio dos valores obtidos nos ensaios experimentais e apresentados na seção 4.3. Os resultados de resistência à tração e deformação encontram-se ilustrados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Comparação dos resultados experimental e numérico para resistência à tração

Compósito	Resistência à tração (MPa)		Erro (%)
	Experimental	Numérico	
Sintético	189,09	168,14	11,08
Natural	84,89	52,67	37,96
Híbrido	144,34	140,03	2,99
Epóxi pura	62,15	77,61	24,88

Tabela 10 – Comparação dos resultados experimental e numérico para deformação

Compósito	Deformação (mm/mm)		Erro (%)
	Experimental	Numérico	
Sintético	4,66	5,21	11,81
Natural	3,71	5,11	37,74
Híbrido	4,31	5,14	19,26
Epóxi pura	4	4,5	12,5

Comparando os resultados experimentais e numéricos é visto uma diferença considerável entre seus valores, essa diferença se dar por conta da variedade de prováveis erros ao realizar uma solução utilizando modelo numérico via MEF, tais como, aproximações de propriedades específicas dos materiais envolvidos, erros numéricos de truncamento, erros e distorções na malha e em seus elementos. Além disso, quanto ao ensaio experimental e considerando que se trata de materiais compósitos fabricados por meio de laminação manual, temos a presença dos vazios e possíveis defeitos de fabricação, que não são computados em uma simulação numérica. Esses fatores respondem a divergência entre os valores encontrados por meio de ensaios experimental e numérico (GIBSON, 2012) (REDDY, 2017).

Os resultados mostram que os compósitos sintéticos (168,14 MPa) têm uma resistência à tração experimental maior do que os compósitos naturais (52,67 MPa) e híbridos (140,03 MPa). No entanto, existe um erro percentual de 11,08% entre os resultados experimentais e numéricos para o compósito sintético, esse erro provavelmente pode ser

explicado por possíveis variações na fabricação do compósito ou nas condições dos ensaios, bem como, no fato da simulação numérica não considerar a porcentagem de espaços vazios existentes e nem as propriedades específicas dos materiais envolvidos. Uma possível solução para melhor convergência desses resultados, é a realização de ensaios experimentais das fibras utilizadas no processo de fabricação dos compósitos, para a realização de modelos matemáticos com as propriedades específicas dos materiais envolvidos, já que a análise foi realizada utilizando propriedades específicas genéricas.

Já para o compósito natural, há uma diferença significativa entre os resultados experimental (84,89 MPa) e numérico (52,67 MPa), com um erro percentual de 37,96%. Isso indica que os resultados numéricos não foram capazes de prever com precisão a resistência a tração do compósito reforçados com fibras de sisal. Essa divergência se dar por se tratar de uma fibra natural heterogênea e facilmente influenciada por diferentes fatores, como, as condições de clima, solo, cultivo e tratamentos químicos utilizados, dessa forma, suas propriedades mecânicas são facilmente variadas (JESUS, 2018).

Por outro lado, o compósito híbrido, que tem a fibra de sisal como componente em comum, apresentou uma diferença de apenas 2,99%, indicando que os resultados numéricos são mais precisos na previsão da resistência a tração desse tipo de compósito. Apesar dos compósitos sintéticos ainda apresentarem os maiores valores quanto a resistência à tração, ainda assim os compósitos híbridos exprimiram um desempenho mecânico considerável (140,03 MPa), indicando cerca de 97,03% da resistência à tração experimental (144,34 MPa) e uma diferença de 16,78% com o compósito sintético numérico (168,14 MPa).

No caso da resina epóxi pura, há uma discrepância de 24,88% entre os resultados experimental e numérico, indicando que a previsão numérica da resistência à tração desse material não é precisa. Em geral, experimentalmente foi utilizada a resina epóxi com endurecedor FAST, enquanto durante a análise numérica foram consideradas as propriedades de uma resina epóxi DGEBA genérica, os resultados quanto a resistência à tração (77,61 MPa) apresentaram um aumento de cerca de 24,88% quanto ao resultado experimental (62,15 MPa). Essa relação destaca a importância de realizar ensaios experimentais para validar os resultados numéricos e aprimorar as simulações numéricas visando prever com mais precisão a resistência à tração dos materiais.

Quanto a deformação, todos os compósitos apresentaram valores superiores ao experimental, visto que a simulação numérica não prevê a presença de vazios e defeitos decorrente do processo de fabricação, fatores que influenciam significativamente na deformação final do compósito (GIBSON, 2012). Diante disso, para facilitar a observação e comparação dessas propriedades com o ensaio experimental, foram plotadas curvas tensão-deformação com intervalos fixos para deformação de 5 mm, conforme é observado na Figura 49.

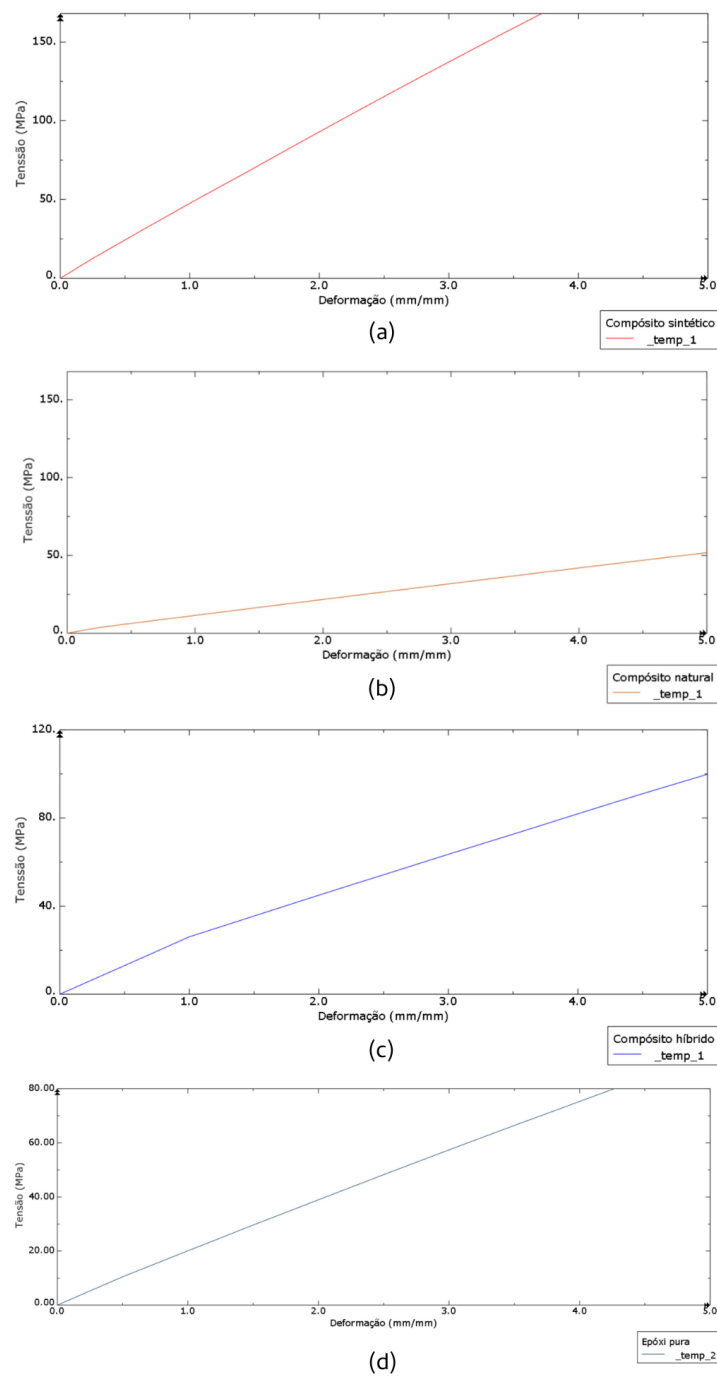


Figura 49 – Curva experimental tensão-deformação do: (a) Compósito sintético. (b) Compósito natural. (c) Compósito híbrido. (d) Epóxi pura.

Avaliando as curvas tensão-deformação é perceptível que os compósitos híbridos e sintéticos apresentaram maiores deformações, se comparados ao compósito natural e a resina epóxi pura. Esse comportamento era previsto, uma vez que contam com a presença das fibras de vidro que, se comparadas com os demais componentes, detêm de alta resistência a deformação. Quanto a deformação da resina epóxi pura, que apresentou o

maior erro, temos que isso se dar por conta da utilização de uma resina epóxi de rápido processamento de cura, onde provavelmente apresenta variações quanto ao seu desempenho mecânico final, visto que além disso, trata-se de uma resina epóxi que não contém solventes e enchimentos.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho, o tratamento químico das fibras de sisal foi realizado em solução de hidróxido de sódio ($NaOH$) e teve um papel fundamental para a atenuação do caráter hidrofílico das fibras e consequente melhora da adesão entre as fibras e a resina epóxi, resultando em uma diminuição na quantidade de fenômenos de arrancamento e deslocamento de fibras. Com relação à qualidade final dos compósitos, estes apresentaram porcentagens de teor de vazios inferiores a 5%, indicando baixas parcelas de conteúdo volátil e pouca perda de material durante o processamento.

No que se refere ao comportamento térmico, foi constatado que o compósito sintético deteve das maiores temperaturas de estabilidade térmica e de transição vítrea do material, enquanto o compósito híbrido apresentou uma menor perda de massa ao atingir $600\text{ }^{\circ}C$ e um maior grau de cura após a cura. Em síntese, todas as amostras apresentaram grau de cura superior a 85%, o que destaca a eficácia da metodologia e as temperaturas utilizadas nos processos de cura e pós-cura. Destaca-se a maior temperatura de estabilidade térmica dos compósitos sintéticos, indicando sua superioridade no que diz respeito ao comportamento térmico.

Quanto aos ensaios de tração, apesar da divergência entre os resultados experimental e numérico, a adição das fibras naturais à resina epóxi pura resultou em um aumento quanto à sua resistência à tração, e se comparados com as propriedades dos compósitos sintéticos, o compósito natural deteve de cerca de 44,91% quanto ao seu limite de resistência à tração, 79,53% para a sua capacidade de deformação final e 53,62% no que se refere ao módulo de elasticidade, isto é, valores ainda muito distantes aos esperados para uma possível substituição total de fibras sintéticas por fibras naturais.

Enquanto, a resistência à tração dos compósitos híbridos ostentaram limites consideráveis, resultando em cerca de 76,33% do limite de resistência à tração dos materiais compósitos sintéticos, 92,45% da capacidade de deformação final e 69,01% quanto ao módulo de elasticidade. Embora os compósitos reforçados com fibras de ambos os tipos apresentem um desempenho mecânico considerável, é importante destacar que eles podem não ser uma solução viável para uma substituição dos materiais totalmente sintéticos, uma vez que suas propriedades não necessariamente são iguais ou superiores.

Quanto aos resultados numéricos, diante da divergência ocasionada pelo uso de propriedades genéricas, observou-se a necessidade de realização de um refino da malha e da substituição de propriedades específicas calculadas via modelagem matemática após a realização dos devidos ensaios experimentais, envolvendo as fibras e a resina epóxi que realmente foram utilizados durante o processo de fabricação dos corpos de prova.

Por fim, é necessário a realização de estudos variando as frações de peso em fibras, a fim de obter materiais mais próximos para consolidar a possibilidade de substituição desses materiais sintéticos por materiais que detêm da combinação com fibras naturais. Porém, ainda assim, dependendo dos esforços nos quais a aplicação será submetida, sendo eles esforços de tração e considerando as frações de volume de fibras iguais para a comparação dos compósitos, é possível afirmar que os compósitos reforçados com fibras naturais ou utilizando a combinação das fibras naturais com as sintéticas, apesar do potencial, ainda não podem substituir os compósitos reforçados apenas com as fibras de vidro.

Apesar dessa substituição ainda não ser viável, é importante ressaltar que a adoção de materiais que combinem fibras naturais e sintéticas pode agregar valor social quanto à preocupação mundial com o meio ambiente e incentivar o desenvolvimento sustentável de materiais compósitos já existentes e implementados em diferentes aplicações. Por isso, os estudos sobre essas possibilidades que alcancem esse objetivo são fundamentais e devem continuar sendo realizados.

5.0.1 Sugestão de Trabalhos Futuros

Recomendações para trabalhos futuros envolvendo o aperfeiçoamento dos resultados entregues e melhor definição quanto a possibilidade de substituição dos compósitos sintéticos pelos compósitos híbridos:

- Fabricar, caracterizar e comparar compósitos com maiores frações de peso em fibras.
- Determinar experimentalmente as propriedades específicas dos materiais através de ensaios mecânicos, a fim de obter resultados coerentes com as medições experimentais para utilizá-las em modelagens numéricas.
- Realizar análise de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier para determinar os grupos funcionais presentes na resina epóxi HEX-135 (*FAST*).
- Cálculo da densidade real dos compósitos utilizando o princípio de Arquimedes, de acordo com as orientações da norma ASTM D792.
- Realizar o ensaio de teor de vazios conforme as normas ASTM D792-08 e ASTM D2734-94 para materiais compósitos.
- Analisar o comportamento higrotérmico dos compósitos realizando ensaios de teste padrão para absorção de água, segundo a norma ASTM D570.
- Testar possíveis aplicações com compósitos híbridos.

Referências

- ABREU, M. M. S. P. et al. Determinação dos estágios de gelificação e de vitrificação na cura de um sistema epóxi-amina por análises dielétrica e dinâmico-mecânica. *9^o Congresso Brasileiro de Polímeros*, v. 9, 2007.
- ADESINA, A. B. O.; ADEWUNMI, A. A.; ADESINA, O. G. Mechanical properties of sisal fiber reinforced epoxy composites. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, v. 15, n. 1, p. 21–26, 2011.
- AKOVALI, G. *Handbook of Composite Fabrication*. [S.l.]: Rapra Technology, 2001.
- ALBINANTE, S. R.; PACHECO, É. B. A. V.; VISCONTE, L. L. Y. Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas. *Química Nova*, SciELO Brasil, v. 36, p. 114–122, 2013.
- ANTUNES, M. B. Estudo de tensões residuais térmicas e do envelhecimento em água marinha em compósitos epóxi/fibra de vidro. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.
- APPELT, A. V. Estudo de processos de infusão e transferência de resina em materiais compósitos. *Engenharia de Produção-Pedra Branca*, 2019.
- ASTM, I. *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. [S.l.: s.n.], 2002.
- AZEVEDO, T. M. Q. de P. Avaliação do comportamento da aderência de um novo sistema de compósito laminado para reforço em estrutura de concreto. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2021.
- BARBERO, E. *Finite Element Analysis of Composite Materials Using ANSYS®*, Second Edition. [S.l.]: Taylor & Francis, 2013. (Composite Materials).
- BATISTA, G. A. Materiais compósitos na aeronáutica. *Revista Pesquisa e Ação*, v. 4, n. 1, p. 240–246, 2018.
- BATISTA, M. da S. Exposição higrotérmica e resistência residual à tração após carregamentos cíclicos em compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de sisal. Universidade de Brasília, 2022.
- BENEDETTO, R. M. D. Estudo da absorção de energia no impacto e pós-compressão do compósito commingled fibra de carbono/poliamida 6 por um modelo de regressão múltipla. Universidade Federal de Itajubá, 2019.
- BENINI, K. C. C. d. C. Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas: Hips/fibra de casca do coco verde e bagaço de cana de açúcar. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2011.
- BLEDZKI, A.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, v. 24, n. 2, p. 221–274, 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670098000185>>.

- BLEDZKI, A.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in polymer science*, Elsevier, v. 24, n. 2, p. 221–274, 1999.
- BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Natural fiber reinforced polymer composites in aerospace engineering: A review. *Applied Sciences*, v. 9, n. 8, p. 1613, Apr. 2019.
- BOUVET, C. *Mechanics of aeronautical composite materials*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017. v. 1.
- BRANCO, C. T. N. M.; FIGUEIREDO, J. M. S. de; FUJIYAMA, R. T. Propriedades elásticas de polímeros reforçados por fibras de vidro pelo método de homogeneização numérica e elementos finitos: um estudo comparativo. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 6, p. 61124–61138, 2021.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais*. Rio de Janeiro, 9 ed: [s.n.], 2016. 910 p.
- CAMPILHO, R. Método de elementos finitos-ferramentas para análise estrutural. Júlia Guimarães, Publindústria Edições Técnicas, Porto, 2012.
- CARVALHO, A. C. Fabricação e caracterização de compósitos à base de resina epóxi e fibras de bananeira. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) – Universidade Federal De São João del-Rei. São João del-Rei., 2015.
- CHONG, T. Y.; LAW, M. C.; CHAN, Y. S. The potentials of corn waste lignocellulosic fibre as an improved reinforced bioplastic composites. *Journal of Polymers and the Environment*, Springer, v. 29, n. 2, p. 363–381, 2021.
- DANIEL, I. M.; ISHAI, O. *Engineering mechanics of composite materials*. [S.l.]: Oxford University Press New York, 2006. v. 1994.
- DUTRA, G. B. et al. Avaliação da utilização da pós cura nas propriedades térmicas e mecânicas de um sistema epóxi de cura à temperatura ambiente. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 24, 2019.
- E-COMPOSITES. *Quem somos*. 2022. Disponível em: <<https://www.e-composites.com.br/quem-somos>>.
- E-COMPOSITES. *Resina Epóxi HEX 135 - FAST*. 2022. Disponível em: <https://www.e-composites.com.br/hex135_fast/p>.
- E-COMPOSITES. *Tecido de Fibra de Vidro VRW700*. 2022. Disponível em: <https://www.e-composites.com.br/tecido_de_fibra_de_vidro_vrw700/p>.
- FRANCKLIN, H. M. et al. Estudo da viabilidade da utilização de compósitos epóxi e fibras de sisal como reforço de estruturas de concreto armado. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, SciELO Brasil, v. 12, p. 255–287, 2019.
- GALLI, C. A. Caracterização das propriedades mecânicas de compósitos de matriz de epóxi com fibras de carbono unidirecionais. *Escola Politécnica-UFRJ*, 2016.
- GENTRY, H. Agaves da América do Norte continental. University of Arizona Press, Tucson, AZ, EUA, 1982.

- GERMANO, B. d. P. *Uso de resíduos de fibra de vidro da indústria eólica na produção de compósitos matriz poliéster*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2022.
- GIBSON, R. F. *Principles of Composite Material Mechanics*. [S.l.]: CRC press, 2012.
- GOMES, S. S. Processos de materiais compósitos de matriz polimérica para aplicações em aeronaves. Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2020.
- GUIMARÃES, B. S. S. Desenvolvimento de compósito epóxi/fibra de vidro produzido por enrolamento filamentar para revestimento interno de coluna de produção de petróleo em aço carbono na exploração offshore. Universidade Federal de São Carlos, 2021.
- GUIMARÃES, F. A. Avaliação das propriedades mecânicas de um compósito híbrido de matriz termoplástica pps reforçado com fibras de carbono contínuas e descontínuas. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2018.
- HAMAD, Q. A. Study of flexural and impact properties of nano-hybrid composites materials by using poly methyl methacrylate (pmma) matrix. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, v. 23, n. 3, p. 114–27, 2019.
- HEARLE, J. W.; LOMAS, B.; COOKE, W. D. *Atlas of fibre fracture and damage to textiles*. [S.l.]: Elsevier, 1998.
- JESUS, F. L. T. D. Estudo comparativo do tratamento alcalino da fibra de sisal com diferentes reagentes químicos. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2018.
- JONES, R. *Mechanics Of Composite Materials*. [S.l.]: CRC Press, 2018.
- JÚNIOR, C. A. R. B.; PARDINI, L. C.; ANCELOTTI, A. C. Obtenção das constantes elásticas efetivas sob condição dinâmica de um laminado híbrido para uso aeronáutico. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 25, 2020.
- JUNIOR, V. D. L. Laminados de fibra de curauá/ epóxi obtidos a partir de pré-impregnados. Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia, Publicação: FGA.DM – 077A/2019, Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia, Faculdade Gama / Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 108p., 2019.
- KNEIPP, A. S. et al. Efeitos dos parâmetros de pós-cura nas propriedades mecânicas da resina epóxi. Joinville, SC, 2019.
- KOFFEND, J. K. *Mechanical Properties of Glass Fibers*. [S.l.]: CRC Press, 1990.
- KOTOWICZ, M. J. *Handbook of Fiber Reinforced Composites*. [S.l.]: CRC Press, 2019.
- KU, H. et al. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 42, n. 4, p. 856–873, 2011.
- LEE, L.; NEVILLE, K. *Handbook of Epoxy Resins*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1967.
- LI, X.; SU, C. *Advanced Composite Materials: Properties, Modeling, and Engineering Applications*. [S.l.]: Springer, 2020.

- LIMA, J. E. S.; ASSUMPÇÃO, T. A. A. de. Estudos de flexibilização de resinas epóxi para utilização em compósitos. *Revista Caleidoscópio*, v. 11, n. 1, p. 63–67, 2019.
- LOPES, B. *Polímeros reforçados por fibras vegetais: um resumo sobre esses compósitos*. [S.l.]: Edgard Blücher, 2017.
- LOPES, B. J. Desenvolvimento e caracterização de compósitos termoplásticos reforçados por fibra de carbono. PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2018.
- LOPES, F. P. D. et al. Ensaio de tração comparativos entre compósitos reforçados com curauá e compósitos reforçados com fibras de vidro. 72º Congresso Anual da ABM, 2017.
- MALLICK, P. *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, Third Edition*. [S.l.]: CRC Press, 2007. (Mechanical Engineering).
- MIRANDA, G. P. M. Agave sisalana, o ouro verde do sertão: O mundo do trabalho e os espaços de resistência narrados pela memória dos velhos sisaleiros do semi-árido paraibano (1970-1990). *Anais do XXVI Simpósio Nacional de História – ANPUH*, 2011.
- MORAES, Á. G. d. O. Estudo do íon boroidreto como agente protetor de fibras de sisal no tratamento em meio alcalino. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2010.
- MOURA, R. C. d. A. Análise da durabilidade de armaduras poliméricas reforçadas com fibras de vidro submetidas ao ambiente alcalino e a elevadas temperaturas. Universidade Federal da Bahia, 2021.
- MÜSSIG, J.; STEVENS, C. *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. [S.l.]: Wiley, 2010. (Wiley Series in Renewable Resource).
- NETO, F. L.; PARDINI, L. C. *Compósitos estruturais: ciência e tecnologia*. [S.l.]: Editora Blucher, 2016. v. 2º.
- NETO, J. L. B. Comportamento mecânico de materiais compósitos submetidos a impacto de baixa velocidade na presença de concentradores de tensão. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2020.
- NIU, F. Y. *E-Glass Fiberglass Chopped Strand Mat*. 2022. Disponível em: <<https://www.ynfiberglass.com/hot-selling-for-china-300gsm-450gsm-600gsm-e-glass-fiberglass-chopped-strand-mat-product/>>.
- NIU, F. Y. *Fiberglass Direct Roving With High Unidirectional Strength Get Free Test Samples*. 2022. Disponível em: <<https://www.ynfiberglass.com/fiberglass-direct-roving-with-high-unidirectional-strength-get-free-test-samples-product/>>.
- OTTOLINI, L. M. *Comportamento Mecânico de uma Tubulação Compósita Reforçada com Fibra de Vidro e Carbono sob Efeito de Envelhecimento Térmico*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2019.

- PACHECO, G. *Análise Numérica e Experimental Em Placa De Material Compósito De Aplicação Na Indústria Automotiva*. [S.l.]: Universidade de Brasília, 2016.
- REDDY, J. N. *An Introduction to the Finite Element Method*. [S.l.]: McGraw Hill Education, 2017.
- REIFSNIDER, R. Mechanical properties of epoxy resins. *Polymer Engineering and Science*, Wiley Online Library, v. 5, n. 1, p. 3–15, 1965.
- ROMANZINI, D. Desenvolvimento e caracterização mecânica e dinâmico-mecânica de compósitos poliméricos híbridos (vidro/ramie) moldados por transferência de resina. Universidade de Caxias do Sul, 2014.
- ROSÁRIO, F. et al. Resíduos de sisal como reforço em compósitos de polipropileno virgem e reciclado. *Polímeros*, SciELO Brasil, v. 21, p. 90–97, 2011.
- RUIHUA, H.; JAE-KYOO, L. Fabrication and mechanical properties of completely biodegradable hemp fiber reinforced polylactic. *Journal of composite materials*, Vol.41 (13), p.1655-1669, 2007.
- RÊGO, J. J. F. de S.; SANTOS, D. L. F.; MARINHO, G. S. Breve histórico da evolução do uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica. *Mens Agitat*, v. 15, n. 1, p. 35–42, 2020.
- SALES, M. B. D. M. Análise experimental e simulação numérica por elementos finitos de ensaios mecânicos em material compósito polimérico reforçado com fibras de vidro. Universidade Estadual do Maranhão, 2022.
- SANTOS, R. D. dos et al. Influência do intemperismo natural nas propriedades morfológicas e mecânicas de fibras de sisal. *Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto*, 2017.
- SAURABH, C.; INDERDEEP, S. Sisal fiber-reinforced green composites: Effect of ecofriendly fiber treatment. *Polymer composites*, Vol.39, p.4310-4321, 2018.
- SILVA, A. F. d. et al. Análise numérica de vigas de concreto armadas com barras de fibra de vidro (gfrp). Universidade Federal de Alagoas, 2022.
- SILVA, C. C. d. *Influência da umidade nas propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos híbridos (sisal/vidro)*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.
- SILVA, G. N. da et al. Método dos elementos finitos aplicado a treliças com comportamento dinâmico. *Revista Brasileira de Iniciação Científica (RBIC)*, Itapetininga, v. 6, n.3, p. 66–81, Centro Universitário UNIFACEX, 2019.
- SILVA, H. P. da. *Comportamento mecânico de compósitos de fibra de vidro/epoxy nano-reforçados*. Tese (Doutorado) — Universidade de Coimbra (Portugal), 2015.
- SILVA, I. L. A. Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta. *Universidade Estadual do Norte Fluminense, Darcy Ribeiro*, 2014.
- SILVA, M. L. P. G. d. Definição de práticas operacionais padrão em polímeros para fins de importação. Universidade Federal de Itajubá, 2017.

- SILVA, R. D. et al. Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibras natural e sintética. *Revista Matéria*, v. 13, n. 1, pp. 154 – 161, 2008.
- SILVA, R. F. d. *Otimização de resina epoxídica com microfibrila de celulose para uso em processo de infusão assistida por vácuo*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2019.
- SILVA, S. O. Controle de qualidade e desempenho de pré-impregnados fibra natural/epóxi para a produção de compósitos. Dissertação de mestrado, Publicação ENM.DM-12/2020, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, DF, 82 p., 2020.
- SILVA, Z. F. S. da. Processamento e caracterização de compósito de sisal e poliuretano derivado de óleo vegetal. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- SIMS, G.; BROUGHTON, W. *Glass fiber reinforced plastics: properties*. Elsevier, 2000.
- SISALSUL. *Nossa empresa*. 2022. Disponível em: <<https://www.sisalsulonline.com.br/nossaempresa>>.
- SOUZA, J. D. et al. Elaboração de material didático-instrucional de processos de fabricação de material compósito de matriz polimérica utilizado na indústria aeronáutica. Universidade Federal de Uberlândia, 2018.
- STARR, T. *Composite Materials Handbook, Volume 2: Properties and Design*. [S.l.]: Department of Defense, 1992.
- SUN, Y.; ADAMS, G. G.; MILEIKO, S. T. Mechanical properties of unidirectional glass fiber reinforced composites with different fiber volume fractions. *Composites Science and Technology*, v. 67, n. 3-4, p. 637–643, 2007. ISSN 0266-3538. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353806002564>>.
- TEIXEIRA, L. A. O efeito da modificação química das fibras de curauá nas propriedades morfológicas, térmicas e mecânicas de compósitos de poliéster. Universidade de Brasília, 2019.
- TEODORO, K. B. et al. Whiskers de fibra de sisal obtidos sob diferentes condições de hidrólise ácida: efeito do tempo e da temperatura de extração. *Polímeros*, SciELO Brasil, v. 21, p. 280–285, 2011.
- VERA, R. V. *Estruturas aeronáuticas de interior em compósito natural: fabricação, análise estrutural e de inflamabilidade*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012.
- VOLTZ, H.; SILVA, R. V. da. Comportamento mecânico em tração de compósitos laminados híbridos com fibras sintéticas e naturais. 68º Congresso Anual da ABM, 2013.
- WORLDOSUCCULENTS. *Agave Sisalana (SISAL)*. 2022. Disponível em: <<https://worldofsucculents.com/agave-sisalana-sisal-hemp-plant-mescal/>>.
- ZARGISKI, R. T. et al. Estudo do comportamento das propriedades termo-mecânicas da resina epóxi a partir do processo de pós-cura. Universidade Federal de Santa Catarina – Joinville, SC, 2018.

APÊNDICE A – Ensaio Experimental

A.1 Cálculo de Massa por Manta

Componente	Fração volumétrica	Densidade (g/cm ³)	Volume (cm ³)	Massa (g)	Massa por camada (g)
Fibra de sisal	0,2	1,45	26,4	38,28	9,57
Fibra de vidro	0,2	2,55	26,4	67,32	33,66
Epóxi e endurecedor	0,8	1,15	105,6	121,44	24,29
Compósito natural	0,2 de fibra de sisal 0,8 de resina	1,2	132	158,4	
Compósito sintético	0,2 de fibra de vidro 0,8 de resina	1,292	132	170,54	
Compósito híbrido	0,1 de fibra de sisal 0,1 de fibra de vidro 0,8 de resina	1,244	132	164,208	
Epóxi pura	1	1,15	132	151,8	
Volume do molde placa	132 cm ³				

A.2 Fratura

Figura 50 – Fraturas para os compósitos: (a) Sintético. (b) Natural. (c) Híbrido. (d) Epóxi pura.



APÊNDICE B – Análise Numérica

B.1 Propriedades Específicas dos Materiais

Propriedade	Fibra de vidro
ρ_t [g/cm ³]	2,5-2,6
E_1 [GPa]	71-73
E_2 [GPa]	25-30
ν_{12}	0,21-0,23
G_{12} [GPa]	40-50
G_{23} e G_{13} [GPa]	20-25
F_{1l} [MPa]	4000-5000
F_{1c} [MPa]	2500-3500
F_{2t} [MPa]	500-800
F_{2c} [MPa]	1000-1500
F_{23} [MPa]	400-500

Fonte: ([KOFFEND, 1990](#)), ([STARR, 1992](#)) e ([KOTOWICZ, 2019](#)).

Propriedade	Fibra de sisal
ρ_t [g/cm ³]	1,3-1,5
E_1 [GPa]	80-90
E_2 [GPa]	30-40
ν_{12}	0,3-0,35
G_{12} [GPa]	6-8
G_{23} e G_{13} [GPa]	4-6
F_{1l} [MPa]	400-600
F_{1c} [MPa]	800-1000
F_{2t} [MPa]	150-250
F_{2c} [MPa]	700-900
F_{23} [MPa]	400-600

Fonte: ([ADESINA; ADEWUNMI; ADESINA, 2011](#))

Propriedade	Resina epóxi
ρ_t [g/cm ³]	1,2-1,4
E_1 [GPa]	3-4
E_2 [GPa]	1,5-2
ν_{12}	0,3-0,35
G_{12} [GPa]	1-2
G_{23} e G_{13} [GPa]	0,5-1
F_{1l} [MPa]	30-60
F_{1c} [MPa]	40-80
F_{2t} [MPa]	15-30
F_{2c} [MPa]	25-50
F_{23} [MPa]	5-10

Fonte: (LEE; NEVILLE, 1967), (REIFSNIDER, 1965).

B.2 Fratura

Figura 51 – Fraturas para os compósitos: (a) Sintético. (b) Natural. (c) Híbrido. (d) Epóxi pura.

