

# **Estudo das propriedades mecânicas de compósitos com matriz de epóxi reforçados com fios de sisal e linho**

**Guilherme Campos Carvalho**

Trabalho realizado sob a orientação de

**Professor Doutor João da Rocha e Silva**

**Professor Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro**

**Professora Doutora Viviane Teleginski Mazur**

**Bragança**

**2020**



# **Estudo das propriedades mecânicas de compósitos com matriz de epóxi reforçados com fios de sisal e linho**

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Industrial no âmbito da Dupla Diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Guilherme Campos Carvalho

2020

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente aos meus pais Edemilson e Claudia, sempre estiveram ao meu lado me apoiando durante toda a minha trajetória. Também agradeço aos meus tios e tias pelo suporte que me deram para eu conseguir completar essa etapa da minha vida.

Aos meus orientadores Prof. Dr. João Rocha, Prof. Dr. Viviane Teleginski Mazur e Prof. Dr. João E. Ribeiro por aceitarem conduzir o meu trabalho de pesquisa e por me orientarem quando tive dúvidas.

A todos os meus professores do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná e do curso de mestrado em Engenharia Industrial do Instituto Politécnico de Bragança, salientando a excelência da qualidade técnica de cada um.

“Luck is what happens when  
preparation meets opportunity.”

**(Sêneca)**

## Resumo

Com a crescente procura por materiais de alto desempenho, o uso de compósitos para substituir materiais clássicos está se tornando cada vez mais necessário. No entanto, atualmente utilizam-se materiais sintéticos como fibra de vidro e carbono para a fase reforço de um material compósito e isso traz implicações negativas ao meio ambiente. Uma alternativa às fibras sintéticas são as fibras naturais como fibra de linho e sisal. Essas fibras são conhecidas por sua resistência mecânica e por possuírem características como abundância, biodegradabilidade, baixa densidade, natureza não tóxica e menor abrasividade aos equipamentos. Levando isso em conta, no presente trabalho fabricaram-se e determinaram-se algumas propriedades dos compósitos de epóxi reforçados com fibras de sisal e com fibras de linho. A confecção dos corpos de prova teve como base a norma ASTM 3039, o alinhamento das fibras e a estimativa do módulo de Young seguiram protocolos abordados na literatura. Na sequência comparou-se os resultados obtidos pelos dois tipos de compósito, constatando que a combinação com linho atingiu 70% a mais de resistência a tração em comparação com o de sisal. Verificou-se também uma correlação diretamente proporcional entre o volume de fibras nos provetes e sua resistência mecânica. Por fim, concluiu-se que os modelos teóricos para o cálculo do módulo de Young se mostraram imprecisos e os dados de resistência à tração na literatura se mostraram variados e pouco similares aos encontrados nos testes realizados. No entanto foi possível constatar a superioridade mecânica do linho “fio do norte” em relação ao sisal e também explicar o comportamento característico de cada compósito levando em conta características de suas fases.

*Palavras Chave: Compósito; Sisal; Linho, Epóxi*

## Abstract

With the growing demand for high-performance materials, the use of composites to replace classic materials is becoming increasingly necessary. However, synthetic materials such as glass fiber and carbon fiber are currently used for the reinforcement phase of a composite material, and this has negative implications for the environment. An alternative to synthetic fibers is natural fibers such as flax fiber and sisal. These fibers are known for their mechanical resistance and other important characteristics such as abundance, biodegradability, low density, non-toxic nature and less abrasiveness to the equipment. Taking this into account, the present work carried out the preparation and analysis of the tensile properties in epoxy composites reinforced with sisal fibers and flax fibers. The preparation of the specimens was based on the ASTM 3039 standard, the alignment of the fibers and the estimation of the Young module followed protocols covered in the literature. Afterwards, the results obtained by the two types of composites were compared, showing that the combination with flax reached 70% more tensile strength compared to sisal. There was also a directly proportional correlation between the volume of fibers in the specimens and their mechanical strength. Finally, it was concluded that the theoretical models for calculating Young's modulus proved to be inaccurate and the tensile strength data in the literature were varied and little similar to those found in the tests carried out. However, it was possible to verify the mechanical superiority of northern flax over sisal and also to explain the characteristic behavior of each composite taking into account the characteristics of its phases.

*Keywords: Composite; Sisal; Flax, Epoxy*

---

# Índice

---

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>II</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>ABREVIACÕES.....</b>	<b>XIII</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 ENQUADRAMENTO .....	14
1.2 OBJETIVOS .....	15
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	15
<b>CAPÍTULO 2: ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>17</b>
2.1 COMPÓSITOS .....	17
2.1.1 A fase matriz.....	19
2.1.2 A fase reforço (ou dispersa).....	20
2.1.3 Interface entre matriz e reforço.....	20
2.2 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS .....	22
2.2.1 Fibras contínuas e alinhadas (curva tensão-deformação).....	23
2.2.2 Fibras descontínuas.....	24
2.2.3 Comprimento das fibras.....	25
2.2.4 Proporção entre fases (Regra da mistura) .....	26
2.3 TIPOS DE FIBRAS.....	26
2.3.1 Fibras sintéticas .....	27
2.3.2 Fibras naturais lignocelulósicas .....	29
2.4 TIPOS DE POLÍMEROS.....	43
2.4.1 Polímeros termoplásticos .....	44
2.4.2 Polímeros termoendurecíveis.....	44
2.5 TRATAMENTOS QUÍMICOS .....	48
2.5.1 Tratamento alcalino .....	49
2.5.2 Tratamento com silano .....	50
2.6 COMPÓSITOS DE FIBRA NATURAL E POLÍMEROS.....	51
2.7 ENSAIOS MECÂNICOS .....	52
2.7.1 Ensaio de tração.....	53



---

2.7.2	Ensaio de flexão .....	57
<b>CAPÍTULO 3: METODOLOGIA.....</b>		<b>62</b>
3.1	MATERIAIS .....	64
3.1.1	Fibras.....	64
3.1.2	Resina epóxi e catalizador.....	64
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	65
3.2.1	Alinhamento das fibras .....	65
3.2.2	Preparação da resina.....	66
3.2.3	Aplicação da resina nas fibras.....	66
3.2.4	Corte e preparo de corpos de prova (provetes).....	67
3.2.5	Ensaio de tração .....	69
3.3	OBTENÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO DE YOUNG .....	71
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>		<b>73</b>
4.1	CORPOS DE PROVA.....	73
4.2	COMPARAÇÃO ENTRE OS COMPÓSITOS .....	74
4.3	ESTIMATIVA DO MÓDULO DE YOUNG PELA REGRA DA MISTURA .....	77
4.4	COMPARAÇÃO COM A LITERATURA .....	80
4.4.1	Sisal/epóxi.....	80
4.4.2	Linho/epóxi.....	81
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO.....</b>		<b>84</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>		<b>86</b>
<b>ANEXO A – RESULTADOS SISAL/EPÓXI .....</b>		<b>93</b>
<b>ANEXO B – RESULTADOS LINHO/EPÓXI.....</b>		<b>94</b>

---

## Lista de figuras

---

- Figura 1.** (a) Tijolos com reforços de palha utilizados em períodos pré-históricos; (b) foguete de pesquisa de alta altitude desenvolvido pela Scales Composites [1]. ..... 17
- Figura 2.** Comparação ilustrativa entre materiais monolíticos convencionais e compósitos [9]. ..... 18
- Figura 3.** Exemplo de esquema de fases em um compósito, adaptado de [2]. ..... 19
- Figura 4.** Classificação dos compósitos segundo [2]. ..... 20
- Figura 5.** Interfaces e interfases em um material compósito: (a) ligação direta entre as fases primária e secundária; (b) adição de um terceiro ingrediente para ligar as fases primária e secundária e formar uma interfase; e (c) formação de uma interfase por solução das fases primária e secundária em seus limites, adaptado de [10]. ..... 21
- Figura 6.** Efeitos do tratamento a resistência ao corte interfacial (RCI) do compósito de cânhamo / PLA /UP [37]. U - não tratado, NaOH - 5% em peso de hidróxido de sódio, AA - anidrido acético (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>), MA - 5% em peso de anidrido maleico, S - 0,5% em peso de silano, NaOH com S - 5% em peso de hidróxido de sódio com 0,5% em peso de silano, adaptado de [7]. ..... 22
- Figura 7.** Representação esquemática de fibras a) contínuas alinhadas, b) descontínuas e alinhadas, c) descontínuas aleatórias , adaptado de [2]. ..... 23
- Figura 8.** Curvas tensão-deformação (a) fibra frágil e matriz dúctil; (b) comparação do comportamento do compósito com fibras alinhadas submetido a um carregamento na direção do alinhamento com (a), adaptado de [2], [13]. ..... 24
- Figura 9.** (a) Braço de suspensão confeccionado com material compósito; (b) Automóvel da Lamborghini modelo *Sesto elemento*. [20], [21]. ..... 25
- Figura 10.** Padrão de deformação da matriz ao aplicar-se uma carga ao longo do material [2]. ..... 25
- Figura 11.** Classificação das fibras, adaptado de [22]. ..... 27
- Figura 12.** Exemplo de (a) fibras de vidro contínua cortadas de um (b) carretel [3]. ..... 27
- Figura 13.** Estrutura organizacional da parece celular de uma fibra lignocelulósica, adaptado de [25]. ..... 29
- Figura 14.** Estrutura genérica das fibras naturais, adaptado de [25]. ..... 29

<b>Figura 15.</b> Comparação de custo por peso entre compósitos naturais e sintéticos, adaptado de [4].	31
<b>Figura 16.</b> Relação entre limite de resistência a tração e densidade de vários compósitos e suas respectivas fibras, adaptado de [4].	32
<b>Figura 17.</b> Relação entre limite de resistência a tração e custo por volume de vários compósitos e suas respectivas fibras, adaptado de [4].	32
<b>Figura 18.</b> Relação entre módulo de elasticidade e densidade de vários compósitos e suas respectivas fibras, adaptado de [4].	33
<b>Figura 19.</b> Relação entre modulo de elasticidade e custo por volume de vários compósitos e suas respectivas fibras, adaptado de [4].	33
<b>Figura 20.</b> Tecidos egípcios confeccionados com linho [31].	34
<b>Figura 21.</b> Plantas de linho usadas para produção das fibras[31].	35
<b>Figura 22.</b> Parte do caule que se utiliza para a produção de fibras, adaptado de [5].	35
<b>Figura 23.</b> Estrutura hierárquica da planta de linho ( <i>Linum usitatissimum</i> L.). Os feixes de fibras do caule técnico estão localizados na parte externa da haste do linho e consistem em várias fibras de linho, adaptado de [5].	36
<b>Figura 24.</b> (a) Definição esquemática do ângulo de micro fibrilas (AMF) na parede celular secundária de fibras vegetais em relação ao eixo celular; (b) Relação entre ângulo da micro fibrila de tipos de fibras e o módulo seu modulo de Young , adaptado de [5].	37
<b>Figura 25.</b> Resistências a tração de fibras naturais de acordo com o ângulo da microfibrila, adaptado de[5]	38
<b>Figura 26.</b> Resistências a tração de fibras naturais de acordo com o conteúdo de celulose, adaptado de [5].	39
<b>Figura 27.</b> (a) Planta de sisal; (b) Sessão transversal de uma folha de sisal; (c)Sessão transversal de um conjunto de fibras, adaptado de [39].	40
<b>Figura 28.</b> Escala hierárquica de estruturas em uma fibra de sisal, adaptado de [39].	41
<b>Figura 29.</b> Organização das paredes celulares na sessão transversal de uma fibra de sisal [39].	42
<b>Figura 30.</b> Junção de três vias com simetria de $120^\circ$ e (b) o anel formado por árvores Steiner [39].	42
<b>Figura 31.</b> Diagrama de transformação Tempo-Temperatura em termorrígidos, adaptado de [41].	45
<b>Figura 32.</b> Etapas de cura de um termoendurecível [42].	46

<b>Figura 33.</b> (a) Estrutura química do grupo epóxico; (b) Estrutura de repetição do éter diglicidílico do bisfenol A (DGEBA) [2], [3].	47
<b>Figura 34.</b> Exemplo provete em formato de osso de cão com possível fratura indesejada, adaptado de [56].	53
<b>Figura 35.</b> Dimensões recomendadas para provetes pela norma ASTM D3039, adaptado de [56], [57].	54
<b>Figura 36.</b> Configuração do teste de três pontos e diagramas de tensão de flexão e de corte associados, adaptado de [56].	58
<b>Figura 37.</b> Flexão em quatro pontos. (a) A distância entre as cargas é um terço do comprimento do suporte. (b) A distância entre as cargas é metade do comprimento do suporte, adaptado de [56], [58].	60
<b>Figura 38.</b> Fluxograma de processos e materiais utilizados para a execução do trabalho.	62
<b>Figura 39.</b> Novelos de (a) fio de sisal e (b) fio do norte.	64
<b>Figura 40.</b> (a) Resina epóxi e (b) catalisador utilizado.	64
<b>Figura 41.</b> Alinhamento de fio do norte utilizando torno mecânico.	65
<b>Figura 42.</b> (a) Alinhamento das fibras durante o processo (b) Procedimento de alinhamento já finalizado.	65
<b>Figura 43.</b> (a) resina e catalisador; (b) pesagem em balança de precisão; (c) mistura da resina e o catalisador.	66
<b>Figura 44.</b> (a) Antes da aplicação da resina (b) depois da aplicação da resina.	67
<b>Figura 45.</b> Conjunto de chapas que serviram de suporte; (a) pós aplicação do desmoldante (b) suporte fechado e pronto para a prensagem.	67
<b>Figura 46.</b> (a) Prensagem do compósito utilizando a prensa; (b) material totalmente curado após 24 h.	67
<b>Figura 47.</b> (a) Rebarbadeira durante o corte; (b) corte completo; (c) partes já separadas da placa pelo processo de corte.	68
<b>Figura 48.</b> (a) Marcação de linhas de guia para corte; (b) Realização do corte.	68
<b>Figura 49.</b> Medidas dos provetes.	69
<b>Figura 50.</b> Provetes do compósito epóxi/linho já cortados.	69
<b>Figura 51.</b> Medida do comprimento entre garras no compósito de sisal.	70
<b>Figura 52.</b> (a) Máquina de ensaios (Shimadzu) utilizada nos ensaios; (b) primeiro ensaio em compósito de sisal no equipamento.	70

<b>Figura 53.</b> Medida do comprimento entre garras no compósito de linho.....	71
<b>Figura 54.</b> Realização de ensaio de tração em compósito de fibra de linho do norte (fio do norte).....	71
<b>Figura 55.</b> Os 8 ensaios realizados com destaque para o resultado inválido por romper próximo a garra do equipamento. ....	73
<b>Figura 56.</b> Padrão de rompimento observado nas fibras de sisal. ....	73
<b>Figura 57.</b> Os 11 ensaios realizados com destaque para os resultados inválido por romper próximo a garra do equipamento. ....	74
<b>Figura 58.</b> Padrão de rompimento do compósito de epóxi/linho (fio do norte). ....	74
<b>Figura 59.</b> Gráfico dos ensaios realizados nos provetes válidos. ....	75
<b>Figura 60.</b> Relação entre percentagem de fibra e resistência a tração encontrada por [61]. .....	81
<b>Figura 61.</b> Relação entre quantidade de fibras e resistência a tração encontrada através dos dados obtidos pelos ensaios. O círculo vermelho representa a região aparente com pouca concentração de fibras de sisal. ....	81
<b>Figura 62.</b> Relação entre quantidade de fibras e resistência a tração encontrada através dos dados obtidos pelos ensaios. O círculo vermelho representa a região aparente com menor concentração de fibras de linho. ....	83

---

## Lista de tabelas

---

<b>Tabela 1.</b> Lista de fibras e suas respectivas origem e propriedades físicas, adaptado de [22]. .....	28
<b>Tabela 2.</b> Composição química de algumas fibras naturais selecionadas, adaptado de [22], [27].....	30
<b>Tabela 3.</b> Vantagens e desvantagem dos compósitos naturais em relação aos sintéticos [29]. .....	31
<b>Tabela 4.</b> Propriedades mecânicas de linho comparadas com fibras sintéticas convencionais, adaptado de [5]. .....	37
<b>Tabela 5.</b> Composição química de diferentes fibras lignocelulósicas, adaptado de [34]...	38
<b>Tabela 6.</b> Propriedades mecânicas de sisal comparadas com fibras sintéticas convencionais, adaptado de [22]. .....	41
<b>Tabela 7.</b> Comparação de vantagens e desvantagens entre polímeros termoplásticos e termoendurecíveis, adaptado de [25].....	43
<b>Tabela 8.</b> Algumas das principais características do epóxi em geral, adaptado de [3]. .....	47
<b>Tabela 9.</b> Algumas das principais características do poliéster em geral, adaptado de [3]. .....	48
<b>Tabela 10.</b> Propriedades mecânicas de compósitos de fibras naturais e epóxi, adaptado de [44].....	51
<b>Tabela 11.</b> Comparação das propriedades mecânicas de compósitos com fibras naturais tratadas com NaOH em relação as não tratadas [55].....	52
<b>Tabela 12.</b> Dados obtidos nos ensaios de tração. ....	75
<b>Tabela 13.</b> Tabela comparativa de propriedades entre os compósitos testados. ....	76
<b>Tabela 14.</b> Comparação entre módulo de elasticidade teórico e experimental. ....	78
<b>Tabela 15.</b> Tabela comparativa de valores de resistência a tração com diferentes porcentagens de fibra de sisal de acordo com a literatura. ....	80
<b>Tabela 16.</b> Tabela comparativa de valores de resistência à tração com diferentes porcentagens de fibra de linho de acordo com a literatura. ....	82

## **Abreviações**

---

APS	Três-aminopropiltrimetoxi-silano
AFM	Ângulo de microfibrila
DETA	Dietilenotriamina
DGEBA	Éter diglicídico do bisfenol A
PET	Tereftalato de polietileno
PLA	Ácido Polilático
UP	Poliéster Insaturado
RCI	Resistência ao corte interfacial

# Capítulo 1: Introdução

---

## 1.1 ENQUADRAMENTO

Com a crescente procura por materiais de alto desempenho nas indústrias, o uso de compósitos para substituir materiais clássicos está se tornando cada vez mais necessário. Essa troca é vantajosa devido a esses materiais possuírem propriedades mecânicas muito similares aos materiais já utilizados, com a vantagem de redução de peso e maior flexibilidade nos ajustes de suas propriedades. Com isso, indústrias das áreas aeronáutica e civil vêm tirando grande proveito desses materiais [1].

Os materiais compósitos podem ser compreendidos como compostos multifásicos que exibem uma proporção significativa das propriedades das fases constituintes [2]. Geralmente são constituídos por duas fases, a fase matriz e a fase reforço. Atualmente, utilizam-se muitas matérias sintéticas como fibra de vidro e carbono para a fase reforço e para a matriz, em geral, utilizam-se resinas termoendurecíveis como epóxi e poliéster [3]. Apesar de suas qualidades serem destacáveis, o uso de fibras e reforços sintéticos em compósitos cria diversos problemas ambientais e até mesmo econômicos. Uma alternativa às fibras sintéticas são as fibras naturais, em especial fibras com propriedades já conhecidas, linho e sisal, por exemplo. As fibras naturais lignocelulósicas possuem características únicas, como a abundância, biodegradabilidade, baixa densidade, natureza não tóxica, menor abrasividade aos equipamentos de transformação e propriedades mecânicas úteis, para não mencionar seu baixo custo. Dessa maneira, são as principais candidatas para substituir as atuais fibras sintéticas, em especial em indústrias de embalagens, automóveis e, até mesmo, no setor da construção civil [4].

As fibras de sisal são produzidas a partir das folhas da planta *Agavesisalana*, originária do México e, atualmente, cultivada em diversas regiões pelo mundo [5]. Já o linho está entre as espécies de plantas mais antigas cultivadas no mundo, sendo a *Linum usitatissimum* L a espécie mais comum [1], [6]. Ambas as fibras vêm sendo muito estudadas nos últimos anos, devido às suas propriedades mecânicas próximas das fibras de vidro, em especial o linho que se encontra entre as mais fortes das fibras lignocelulósicas. No entanto,



ainda há vários fatores que prejudicam o uso dessas fibras nos compósitos em larga escala. Um problema comum deve-se à falta de dados relativos às propriedades mecânicas em diferentes proporções entre as fases dos compósitos e também problemas intrínsecos às fibras naturais, como incompatibilidade química entre a fibra e a matriz e degradação biológica não planejada [7]. Devido a isso, o presente estudo pretende determinar as propriedades mecânicas de tração de compósitos de fibras naturais de linho e sisal com matriz polimérica de epóxi e compará-las com os dados já listados na literatura.

## 1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo é determinar as propriedades mecânicas de compósitos de epóxi com fibras de sisal e linho. Para alcançar esse objetivo principal foi necessário desenvolver um conjunto de atividades intermédias ou objetivos específicos que podem ser listados da seguinte forma:

- Definir o que são compósitos e suas classificações;
- Definir o que são fibras naturais e as propriedades das fibras de sisal e do linho;
- Definir o que são polímeros e as propriedades dos epóxis;
- Explicitar técnicas e métodos para o desenvolvimento de ensaios de tração e flexão em compósitos poliméricos;
- Realizar ensaios mecânicos nos laboratórios;
- Estimar o módulo de elasticidade dos compósitos seguindo modelos da literatura.

## 1.3 ESTRUTURA DA TESE

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

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

O Capítulo 2 apresenta as informações e os estudos já existentes a respeito das fibras naturais, compósitos e polímeros, bem como suas características físicas e mecânicas. Além

disso, nesse capítulo são explicitadas as bases teóricas para o desenvolvimento e cálculo das propriedades mecânicas de materiais compósitos.

O Capítulo 3 explicita a metodologia utilizada para confecção e ensaio de corpos de prova, abordando os materiais e equipamentos utilizados, a preparação das amostras, os parâmetros dos ensaios e o tratamento dos dados.

O Capítulo 4 expõe os resultados do experimento após o tratamento de dados, sendo informados os valores de tensão de ruptura e módulo de elasticidade dos materiais envolvidos. Ainda nesse capítulo os dados são analisados, discutidos e comparados com os valores encontrados na literatura.

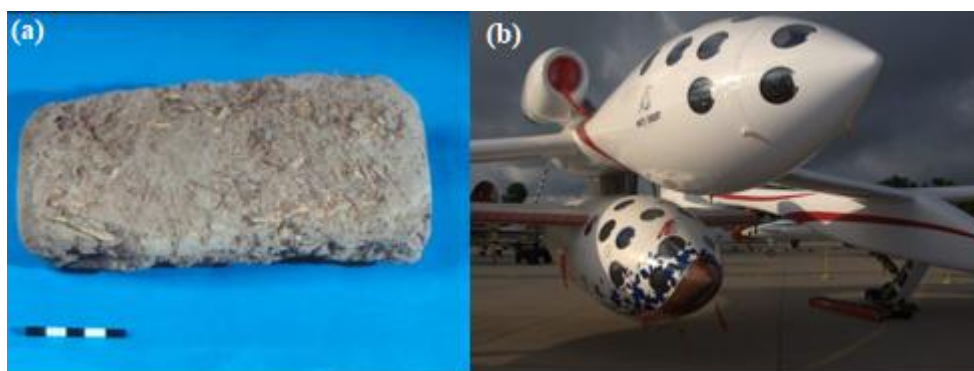
O Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas pela interpretação dos dados pós-discussão e são propostos estudos futuros para o desenvolvimento do tema.

Por fim, se encontram as referências bibliográficas utilizadas como base para o desenvolvimento da tese. Os elementos pós-textuais encontram-se ao final do documento e são compostos pelos Anexos A e B.

## Capítulo 2: Estado da arte

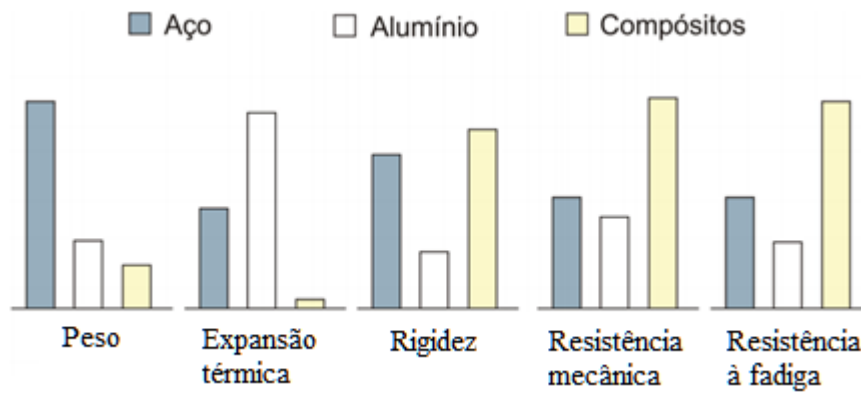
### 2.1 COMPÓSITOS

Um dos primeiros registros de produção e uso de um material compósito foi o papel de papiro feito pelos egípcios a cerca de 4000 a.C. Além disso, há evidências de uso de palha como reforço em argila datadas de períodos pré-históricos (Figura 1.a) [1], [3].



**Figura 1.** (a) Tijolos com reforços de palha utilizados em períodos pré-históricos; (b) foguete de pesquisa de alta altitude desenvolvido pela Scales Composites [1].

Desde o início da década de 1960, tem crescido a procura por materiais mais resistentes e leves, em diversos setores da indústria como nas áreas da: energia, construção civil e aeroespacial, tendo este último um exemplo do uso avançado dos compósitos no SpaceShipOne, um foguete de pesquisa desenvolvido pela Scale Composites (Figura 1.b). Dessa maneira, a utilização de materiais convencionais monofásicos para aplicações de alto desempenho se tornou cada vez menos atrativa e tomou-se como alternativa o ressurgimento do conceito antigo de combinar diferentes materiais em um único material, obtendo-se assim características mistas e/ou aprimoradas. Conceito esse compreendido por compósitos [8]. A Figura 2 mostra uma comparação ilustrativa do conceito, relacionando propriedades de materiais convencionais (aço e alumínio) com compósitos substitutos [9], [10].



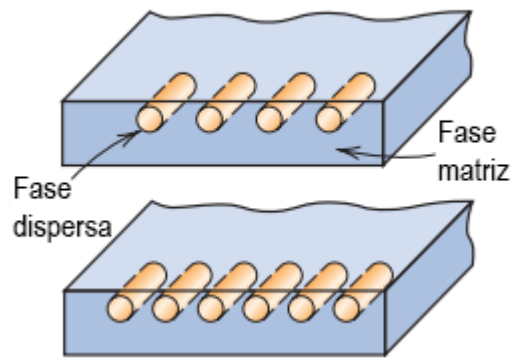
**Figura 2.** Comparação ilustrativa entre materiais monolíticos convencionais e compósitos [9].

Os compósitos também são encontrados naturalmente em diversas situações, desde árvores, pelagem de animais, até sistemas mais complexos como o corpo humano, formando cabelos, músculos e ossos [11].

Apesar de não haver nenhuma definição universalmente aceita para o termo, um material compósito pode ser compreendido como um composto multifásico que exhibe uma proporção significativa das propriedades das fases constituintes [2].

No entanto, essa definição é um tanto abrangente, pois partindo dela praticamente tudo pode ser considerado um material compósito, tanto aquilo que é fabricado pelo homem quanto o que já existe na natureza. Por isso, uma definição mais restrita para esse tipo de materiais e que será utilizada nesse trabalho é a proposta por [3]: “É um material fabricado que consiste em duas ou mais características físicas e/ou quimicamente distintas, devidamente organizadas em fases ou distribuídas com uma interface que as separa. Além disso, possui características que não são representadas por nenhum dos componentes isoladamente” [3]

A maior parte dos compósitos são formados por duas fases, uma chamada matriz, que é contínua e envolve uma segunda fase, normalmente chamada de fase dispersa, como pode ser visto na Figura 3.



**Figura 3.** Exemplo de esquema de fases em um compósito, adaptado de [2].

### 2.1.1 A fase matriz

A matriz pode ser constituída de diversos materiais e tem como principal função unir as fases dispersas e transferir as cargas aplicadas entre elas. No entanto, essa fase também possui o papel de [12]:

- Manter as fibras na orientação e localização desejadas no caso de compósitos fibrosos;
- Proteger o reforço de um ambiente adverso e danos causados por temperatura, umidade, produtos químicos e degradação por abrasão;
- Transferir as forças de corte interlaminar;
- Melhorar as propriedades transversais do compósito;
- Melhorar a resistência ao impacto e à fratura do compósito.

Segundo Groover [10], podemos classificar os compósitos em relação ao tipo de material da sua fase matriz. Dessa maneira, temos as seguintes classes:

Compósitos com matriz metálica: que misturam cerâmica, carbonetos cimentados, fibras fortes e de alta rigidez e também outros metais a uma matriz metálica.

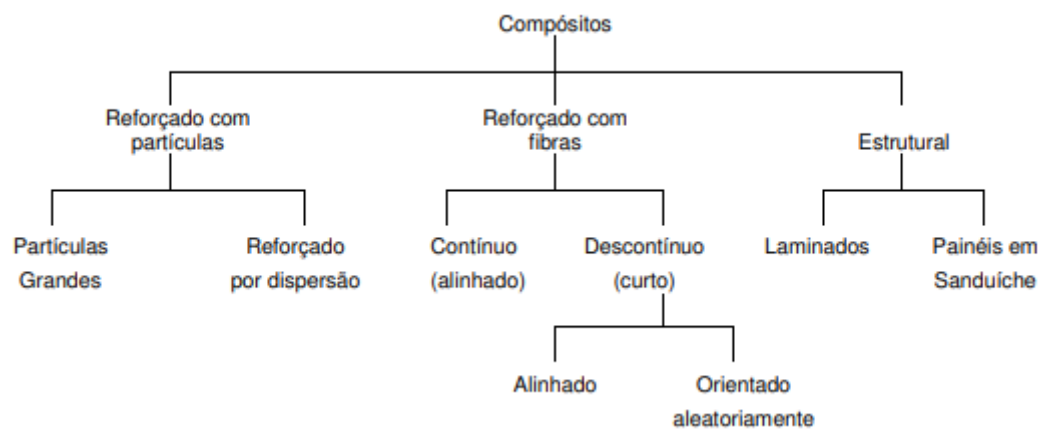
Compósitos de matriz cerâmica: constituindo a categoria menos comum.

Compósitos de matriz polimérica: as resinas termoendurecíveis são os polímeros mais utilizados nessa categoria. Epóxi e poliéster são comumente misturados com reforços de fibra. No caso de polímeros termoplásticos como matriz, utiliza-se em geral pós como fase dispersa.

### 2.1.2 A fase reforço (ou dispersa)

Os reforços podem ter a forma de partículas, flocos, fibras curtas, fibras contínuas ou folhas. Porém a maioria dos reforços usados nos compósitos tem uma forma fibrosa, pois nessa geometria os materiais são mais fortes e mais rígidos do que em qualquer outra forma, além de serem muito flexíveis. A principal função dessa fase é de suportar efetivamente as tensões que o material é submetido [3].

De acordo com Callister e Rethwisch [2], os compósitos podem ser classificados também de acordo com seu reforço, conforme pode ser visto na Figura 4 .



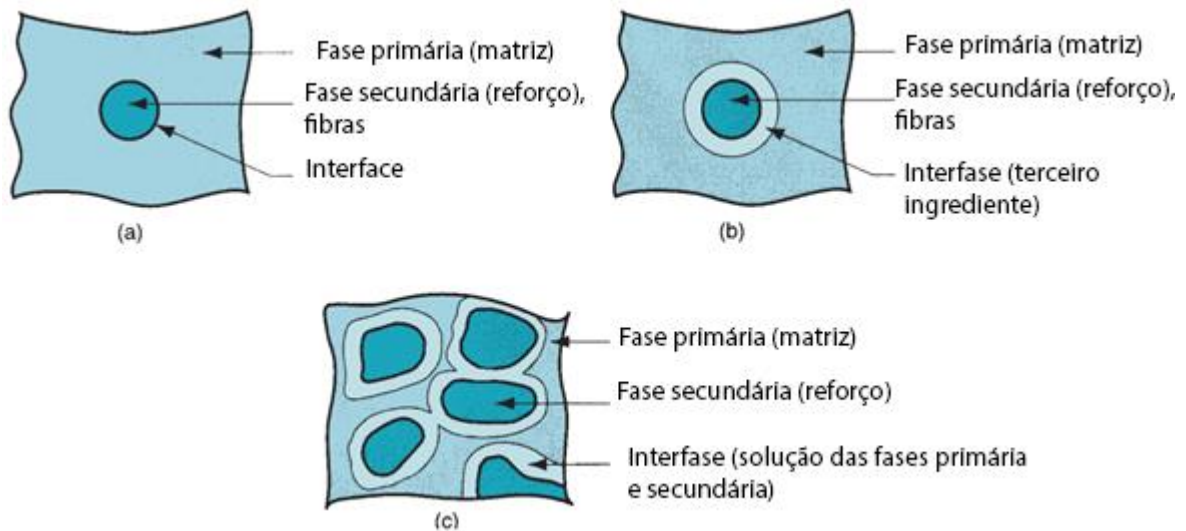
**Figura 4.** Classificação dos compósitos segundo [2].

Essa classificação divide os compósitos em três principais classes: os reforçados com partículas, reforçados com fibras e os estruturais.

Compósitos reforçados com partículas apresentam a fase dispersa com eixos iguais, ou seja, as dimensões das partículas são aproximadamente iguais em todas as direções. Aqueles reforçados com fibras possuem fase dispersa com geometria de fibra, tendo comprimento maior que o diâmetro. E por fim, a última classificação se dá aos compósitos estruturais, os quais são combinações de compósitos e materiais homogêneos [2].

### 2.1.3 Interface entre matriz e reforço

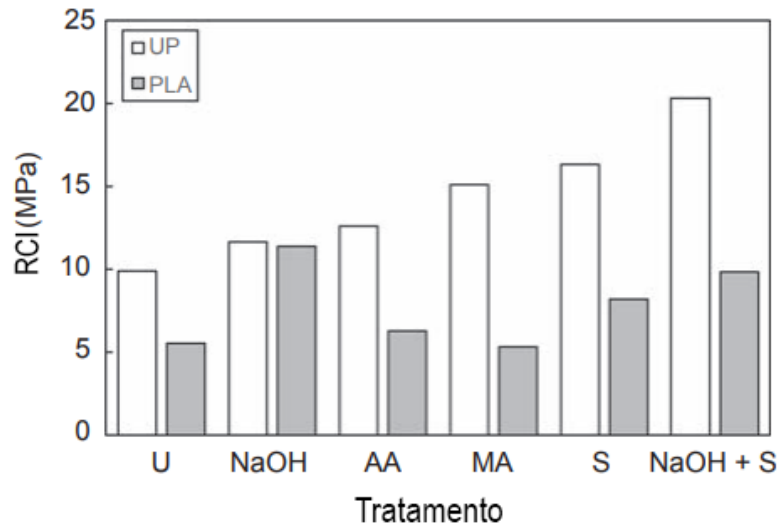
A interface entre as fases constituintes (Figura 5.a) influencia diretamente nas propriedades finais do material, pois apesar dos materiais primários serem geralmente insolúveis entre si, é necessário que haja afinidade química entre matriz e reforço para que se mantenha a coesão e a distribuição das cargas entre as fases do compósito [13], [14].



**Figura 5.** Interfaces e interfases em um material compósito: (a) ligação direta entre as fases primária e secundária; (b) adição de um terceiro ingrediente para ligar as fases primária e secundária e formar uma interfase; e (c) formação de uma interfase por solução das fases primária e secundária em seus limites, adaptado de [10].

Quando há a predominância dessa afinidade química na interface ocorre a formação de uma fase intermediária ou interfase que une a primeira e a segunda fase do compósito, como pode ser visto na Figura 5.b. Essa fase intermediária é consolidada pelas forças intermoleculares e energia livre de superfície, podendo ser encontrada por todo o material (Figura 5.b). A qualidade dessa interfase depende de alguns fatores como a humidade, a reação química, as tensões residuais, a morfologia da superfície e a rugosidade dos materiais [15].

Muitos exemplos na literatura vêm obtendo, com sucesso, o aprimoramento das propriedades dos compósitos por meio de tratamentos químicos nas fases, como é o caso do experimento realizado por [7], onde compósitos de cânhamo/poliéster(UP) e cânhamo/ácido polilático (PLA) tiveram suas fibras submetidas a diversos tratamentos, o que resultou em aumento da resistência ao corte interfacial (RCI) máxima de aproximadamente 100%, como pode ser visto na Figura 6. Isso resultaria em um melhor intertravamento mecânico entre fibra e matriz e conseqüentemente uma maior distribuição das tensões pelo material.



**Figura 6.** Efeitos do tratamento a resistência ao corte interfacial (RCI) do compósito de cânhamo / PLA /UP [37]. U - não tratado, NaOH - 5% em peso de hidróxido de sódio, AA - anidrido acético ( $C_4H_6O_3$ ), MA - 5% em peso de anidrido maleico, S - 0,5% em peso de silano, NaOH com S - 5% em peso de hidróxido de sódio com 0,5% em peso de silano, adaptado de [7].

## 2.2 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

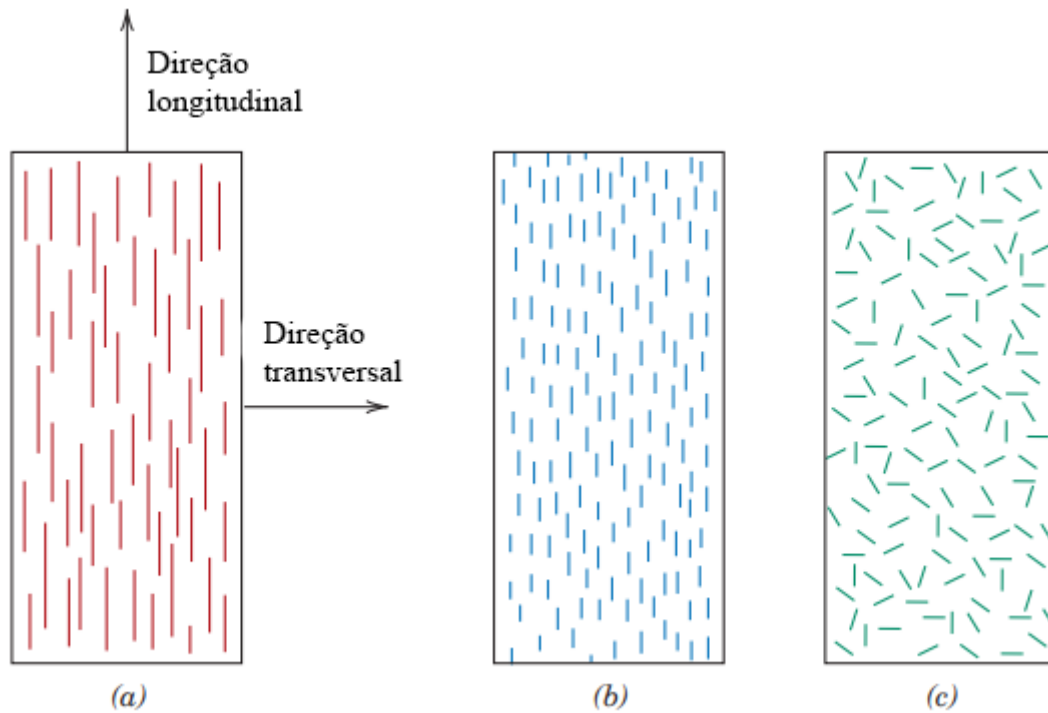
Os compósitos fibrosos são caracterizados por possuir uma fase dispersa constituída por fibras de alto módulo de Young por unidade de massa. Essa combinação estrutural frequentemente possui alta resistência e/ou rigidez em relação ao seu peso [2], [11], [16].

As características mecânicas desses compósitos são influenciadas pela [16], [17]:

- Geometria das fibras, seção transversal e comprimento;
- Arranjo das fibras;
- Proporção entre os materiais;
- Características da interface dos materiais.

Pelo fato da orientação das fibras interferirem em suas propriedades, é possível classificar os compósitos fibrosos em função do arranjo de suas fibras (Figura 7), podendo estas serem contínuas (fibras alinhadas e longas), descontínuas alinhadas (fibras alinhadas e curtas) e descontínuas aleatórias (fibras aleatórias e curtas) [18]. A Figura 7 ilustra as diferenças entre cada classificação de compósitos fibrosos.





**Figura 7.** Representação esquemática de fibras a) contínuas alinhadas, b) descontínuas e alinhadas, c) descontínuas aleatórias, adaptado de [2].

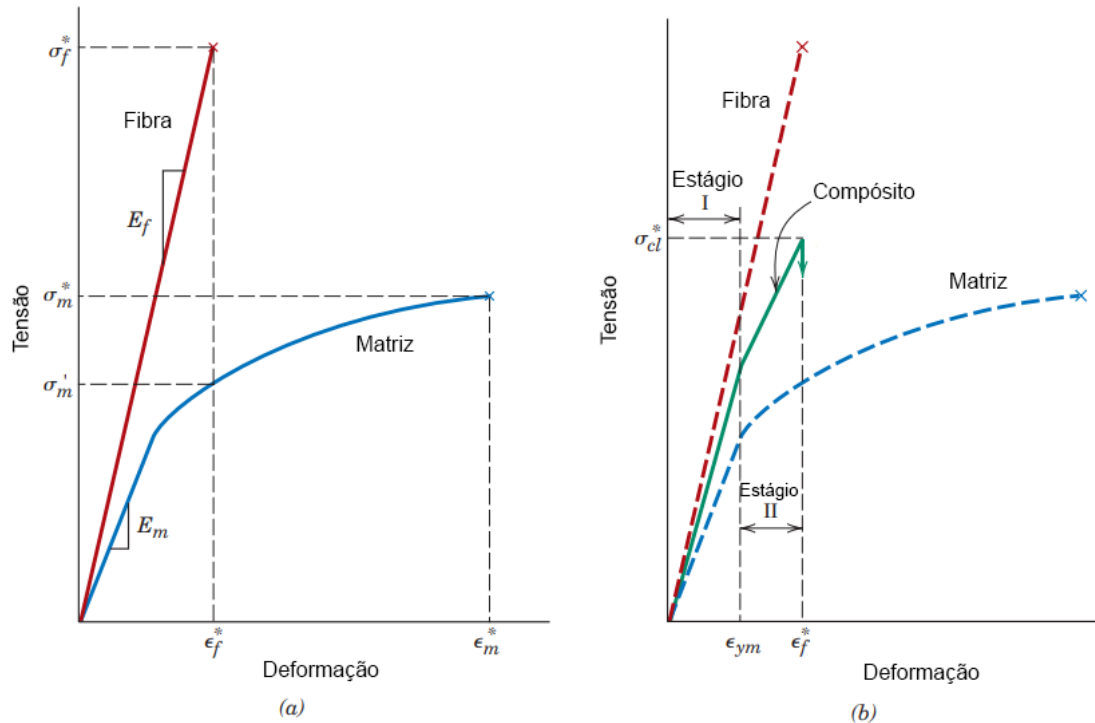
Em geral, fibras alinhadas e longas apresentam maior resistência mecânica na direção do carregamento. No entanto, fibra com orientação aleatória resulta em compósitos com propriedades quase isotrópicas [18], [19].

### 2.2.1 Fibras contínuas e alinhadas (curva tensão-deformação)

Nesse tipo de compósito as propriedades mecânicas são altamente anisotrópicas, ou seja, dependem da direção em que são medidas. Dessa maneira, um carregamento aplicado na direção longitudinal das fibras, assumindo uma matriz dúctil e fibras frágeis, produz as curvas de tensão-deformação explicitadas na Figura 8.

A Figura 8.a mostra o comportamento dos materiais que compõe o compósito de maneira isolada,  $\sigma_f^*$  e  $\sigma_m^*$  representam a tensão de ruptura da fibra e da matriz, enquanto que  $\epsilon_f^*$  e  $\epsilon_m^*$  são suas respectivas deformações até a ruptura. A Figura 8.b, ilustra o comportamento característico de um compósito. No primeiro momento da aplicação da carga (estágio 1) ambas as fibras e a matriz deformam elasticamente e a medida em que a tensão aumenta, o comportamento do material deixa o regime elástico e passa ao estágio 2, o qual é aproximadamente linear, porém com uma inclinação inferior ao estágio 1. A partir desse ponto inicia-se o processo de ruptura do material demarcado essencialmente pelo gradativo

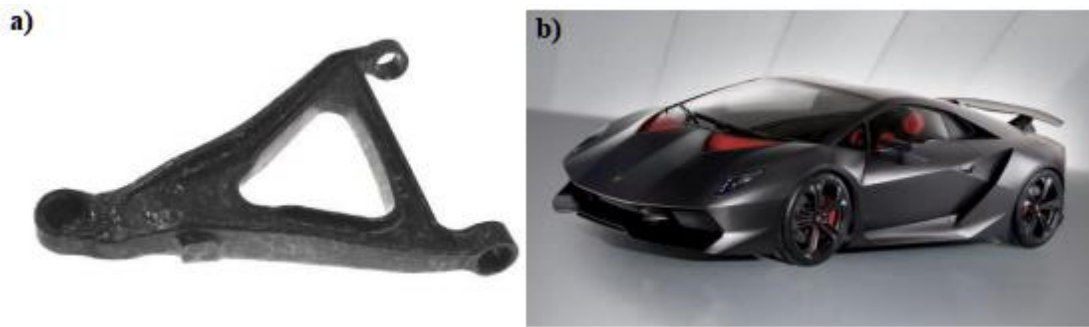
rompimento das fibras e a deformação plástica da matriz. Devido à natureza gradativa do rompimento, a falha de um material compósito na maior parte dos casos não é catastrófica [2].



**Figura 8.** Curvas tensão-deformação (a) fibra frágil e matriz dúctil; (b) comparação do comportamento do compósito com fibras alinhadas submetido a um carregamento na direção do alinhamento com (a), adaptado de [2], [13].

### 2.2.2 Fibras descontínuas

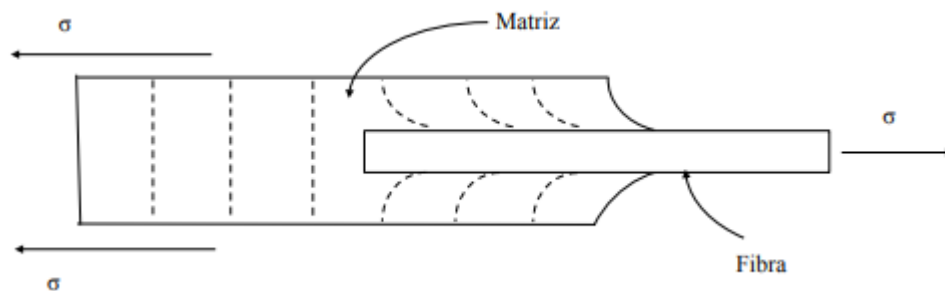
Embora a eficiência do reforço seja menor para fibras descontínuas do que para fibras contínuas, os compósitos de fibra descontínuas e/ou aleatórias estão ganhando espaço no mercado, como, por exemplo, no mercado de automóveis, onde foram utilizadas fibras curtas de carbono distribuídas aleatoriamente em resina viniléster para confeccionar os braços de suspensão e *cockpit* do automóvel (Figura 9.a) da Lamborghini, modelo *Sesto elemento* apresentado em 2010 no salão automóvel de Paris (Figura 9.b) [20], [21].



**Figura 9.** (a) Braço de suspensão confeccionado com material compósito; (b) Automóvel da Lamborghini modelo *Sesto elemento*. [20], [21].

### 2.2.3 Comprimento das fibras

Quando uma carga é aplicada, a ligação fibra-matriz cessa nas extremidades da fibra, produzindo um padrão de deformação da matriz, como pode ser visto na Figura 10.



**Figura 10.** Padrão de deformação da matriz ao aplicar-se uma carga ao longo do material [2].

Devido a esse comportamento, é necessário um certo comprimento crítico de fibra para que exista um efetivo aumento da resistência e um enrijecimento do material como um todo. Esse comprimento crítico,  $l_c$ , depende do diâmetro da fibra,  $d$ , e do seu limite de resistência a tração,  $\sigma_f^*$ , bem como o limite de escoamento cisalhante entre a fibra e a matriz (ou apenas da matriz, a qual for menor),  $\tau_c$ . Essa relação é expressa através da Equação 1 [2].

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2 \tau_c} \quad \text{Equação 1}$$

### 2.2.4 Proporção entre fases (Regra da mistura)

Quanto menor o teor de fibras mais o comportamento do compósito se aproximará do comportamento da matriz. Assim, os compósitos possuem flexibilidade para se adequar a variados níveis, aplicações e processamento. Porém, uma estrutura desse tipo é consideravelmente mais difícil de se projetar do que, por exemplo, o de uma estrutura metálica [16], [17].

Para compósitos reforçados com fibras existe um modelo numérico (Equação 2) baseado na regra de misturas que é capaz de estimar as propriedades mecânicas dos materiais constituintes bem como a proporção volumétrica de cada fase. Essa equação é utilizada para calcular o módulo de elasticidade e a resistência do material híbrido. A regra das misturas é válida para pequenas deformações dentro da região linear elástico, assumindo que não há qualquer interação físico-química entre os materiais envolvidos [18], [22].

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad \text{Equação 2}$$

$E_c$  = módulo de elasticidade do compósito;

$E_f$  = módulo de elasticidade da fibra;

$E_m$  = módulo de elasticidade da matriz;

$V_f$  = fração volumétrica de fibras;

$V_m$  = fração volumétrica da matriz.

O comportamento típico desse novo material pode ser visto anteriormente na Figura 8, levando em conta um compósito com matriz dúctil e fibras frágeis, sendo  $(\sigma_f)$  e  $(\sigma_m)$  correspondentes à resistência e à ruptura, e  $(\epsilon_f)$  e  $(\epsilon_m)$  as deformações da fibra e matriz, respectivamente.

## 2.3 TIPOS DE FIBRAS

As fibras são classificadas de acordo com a origem (ver Figura 11), sendo utilizados diversos materiais para a sua confecção. No entanto, as mais utilizadas, segundo a literatura, são as fibras de vidro, de carbono e as naturais [22], [23].

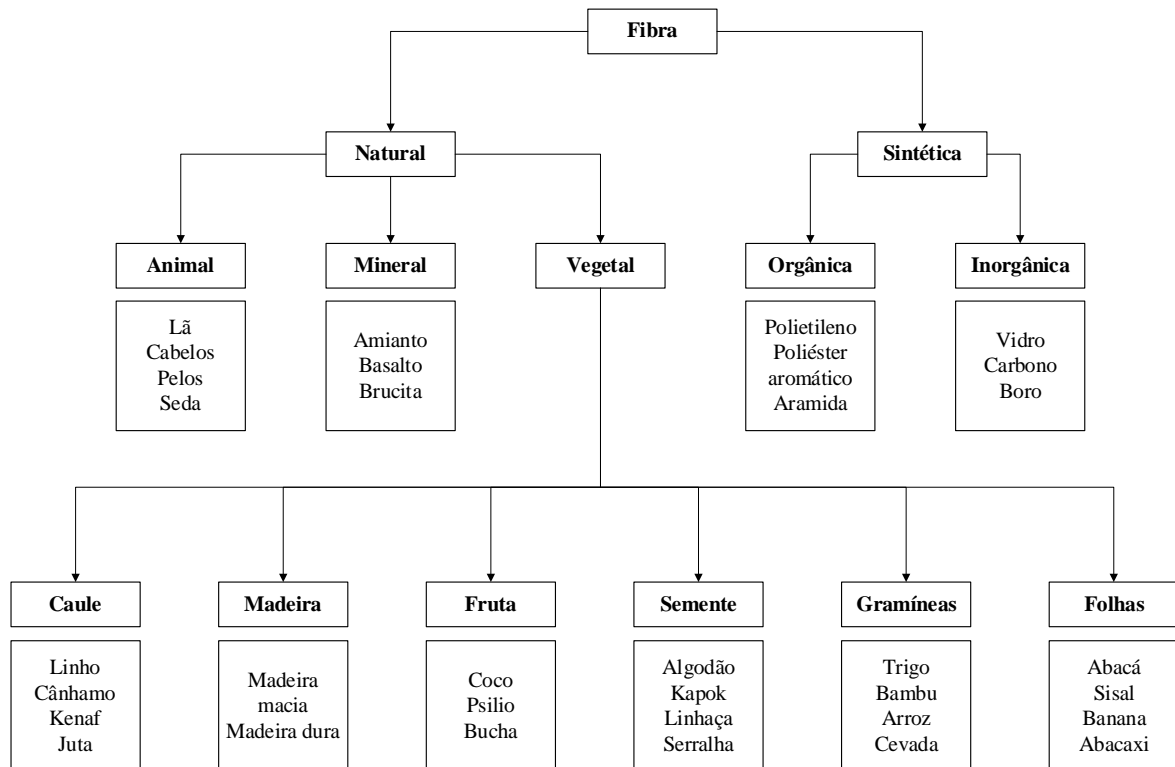


Figura 11. Classificação das fibras, adaptado de [22].

### 2.3.1 Fibras sintéticas

As fibras sintéticas compreendem as fibras produzidas pelo homem, tendo como exemplos as fibras de vidro (Figura 12), aramida, polietileno, boro, carboneto de silício, carbono e alumina.

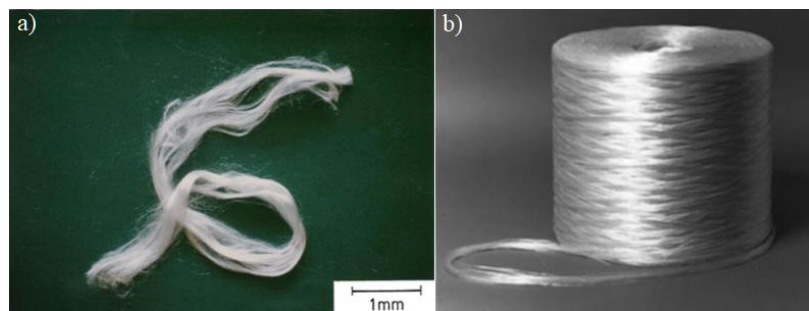


Figura 12. Exemplo de (a) fibras de vidro contínua cortadas de um (b) carretel [3].

A fibra de vidro, em suas diversas formas, tem sido o reforço mais comum para matrizes poliméricas. A fibra de aramida, lançada na década de 1960, é muito mais rígida e mais leve que a fibra de vidro. Outras fibras de alto desempenho como as de boro, carboneto de silício, carbono e alumina foram desenvolvidas na segunda parte do século XX [3]. Mesmo no estudo de compósitos naturais, como é o caso deste trabalho, utiliza-se as fibras sintéticas como parâmetro de comparação em relação à resistência e aplicabilidade [4]. Essa

comparação pode ser vista na literatura, como no estudo realizado por [24], o qual comparou o uso desses materiais na indústria de automóvel.

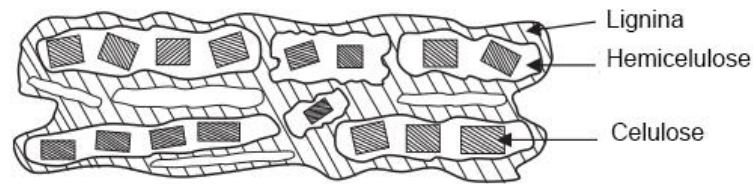
A Tabela 1 mostra alguns parâmetros gerais das principais fibras de acordo com a literatura, incluindo as fibras naturais que serão abordadas no próximo tópico.

**Tabela 1.** Lista de fibras e suas respectivas origem e propriedades físicas, adaptado de [22].

Nome	Produção anual [Milhão]	Origem	Preço kg <sup>-1</sup> [USD]	Densidade de [g/cm <sup>3</sup> ]	Resistência a tração [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Deformação [%]	Conteúdo de mistura [%]
Abacá	0.07	Folha	1–1.5	1.5	430–813	31.1–33.6	2.9–10	14
Bagaço	Abundante	Gramínea	0.2	0.89	350	22	5.5	
Bambu	100	Gramínea	2.2–3.25	0.6–1.25	290	11–17	–	9
Banana	2.5	Folha	0.1–0.75	1.35	529–914	27–32	2.6–5.9	10–11
Coir	Abundante	Fruta	0.2–0.4	1.15–1.25	131–220	4–6	15–40	10
Algodão	0.0185	Semente	1.5–2.2	1.51	400	12	3–10	33–34
Palma de tâmara	4.2		0.025	0.7–1.2		60–80	2–19	
Linho	0.81	Haste	3.11	1.4	800–1500	60–80	1.2–1.6	7
Madeira de lei		Madeira	0.44	0.3–0.88	51–121	5.2–15.6		
Cânhamo		Haste	1.55	1.48	550–900	70	1.6–4.0	8
Juta	0.25	Plantas	0.926	1.3–1.48	393–800	13–26.5	1.16–1.8	12
Kenaf	0.77	Haste	0.378	–1.4	284–930	21–60	1.6	6.2–20
Urtiga		Entrecasca	–	1.51	650	38	1.7	11–17
Abacaxi	Abundante	Folha	0.1–0.18	1.44	413–1627	60–82	14.5	10–13
Rami	0.1	Haste	2	1.5	500	44	2	12–17
Sisal	0.3	Folha	0.65	1.3–1.4	Z'	12–41	2.3–2.5	11
softwood		Madeira	0.44–0.55	0.30–0.59	45.5–111	3.6–14.3	–	–
Basalto		Mineral		2.8	2800	8.5	2.8	
S-Glass	–	-	2	2.5	2000–3500	70–73	1.8–3.2	–
E-Glass	–	-	2	2.55	3–3.5	63–67	2.5	–
Aramida	–	-		1.44	3000	124	2.5	–
Carbono	–	-	8–14	1.4	400	230–240	1.4–1.8	–
Carboneto de silício				3.16		360–440	–	–

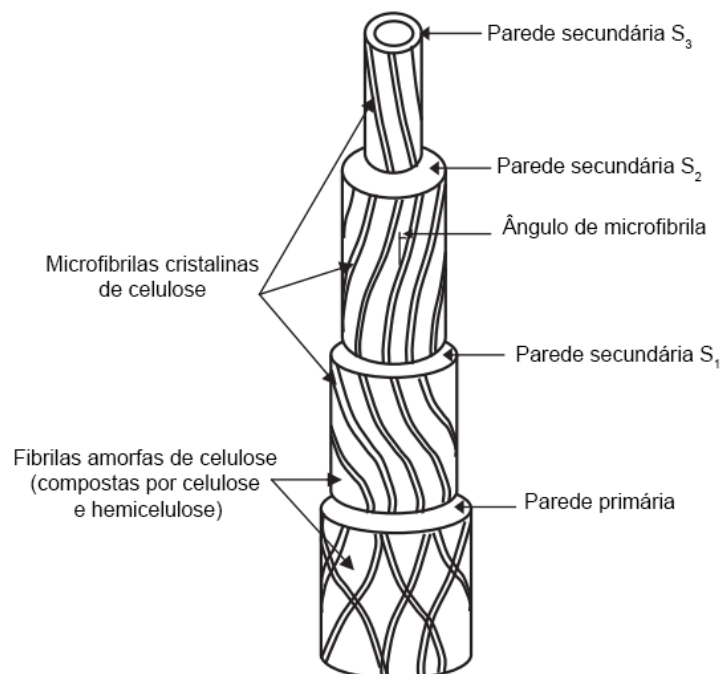
### 2.3.2 Fibras naturais lignocelulósicas

As fibras naturais ou biofibras são subdivididas de acordo com a sua origem, podendo ser de plantas, animais ou minerais (Figura 11). Todas as fibras originadas de plantas são compostas principalmente por celulose (Figura 13), por isso o nome fibras lignocelulósicas, enquanto as de animais são formadas por proteínas (Ex.: lã, seda, cabelo).



**Figura 13.** Estrutura organizacional da parede celular de uma fibra lignocelulósica, adaptado de [25].

O foco deste trabalho será exclusivamente nas fibras vegetais, dessa forma, o uso do termo “fibras naturais” referir-se-á exclusivamente a fibras provenientes de vegetais. As fibras dos vegetais podem ser extraídas da entrecasca, do caule, das sementes, das folhas e dos frutos da planta [26]. S<sub>3</sub>



**Figura 14.** Estrutura genérica das fibras naturais, adaptado de [25].

Esse tipo de fibra é caracterizado pela presença de fibrilas de celulose incorporadas em uma matriz de lignina. As fibrilas de celulose são alinhadas ao longo do comprimento da

fibra (ver Figura 14), o que confere resistência máxima à tração e à flexão, além de proporcionar rigidez. A eficiência de reforço da fibra natural está relacionada à natureza da celulose e sua cristalinidade. Os principais componentes das fibras naturais são celulose, hemicelulose, lignina, pectinas e ceras. A Tabela 2 mostra as propriedades químicas de algumas fibras naturais, incluindo o linho e o sisal, focos do presente trabalho [26].

**Tabela 2.** Composição química de algumas fibras naturais selecionadas, adaptado de [22], [27].

Tipo de fibra	Celulose [%]	Lignina [%]	Hemicelulose [%]	Pectina [%]	Cera [%]	Cinza [%]	Ângulo microfibrilar [°]
Abacá	53–63	7–9	20–25	–	3	–	20–25
Bambu	26–43	1–31	30	–	10	–	–
Banana	63–83	5	–	–	11	–	11–12
Pó de coco	36–43	0.15–0.25	41–45	3–4	–	–	30–49
Algodão	83–91	–	3	0.6	8–9	–	–
Linho	64–72	2–2.2	64–72	1.8–2.3	–	–	5–10
Cânhamo	70–74	3.7–5.7	0.9	0.8	1.2–6.2	0.8	2–6.2
Juta	61–72	12–13	18–22	0.2	0.5	0.5–2	8
Kenaf	45–57	22	8–13	0.6	0.8	2–5	2–6.2
Urtiga	86	4	5.4	0.6	3.1	–	–
rachis	43	26	–	–	–	–	28–37
Rami	69–91	0.4–0.7	5–15	1.9	–	–	69–83
Casca de arroz	38–45	–	–	–	–	20	–
Sisal	78	8	10	–	2	1	10–22
Madeira de lei	43–47	25–35	–	–	–	–	–
softwood	40–44	25–29	–	–	–	–	–

A utilização das fibras naturais como reforço tem como vantagem o fato de serem abundantes, biodegradáveis e renováveis. Além disso, as fibras vegetais, em geral, são resistentes à corrosão, mais leves e baratas quando comparados com as de vidro, carbono e aramida. Essas características vêm atraindo a atenção da indústria pois é possível atingir uma alta performance com um baixo custo [26], [28].

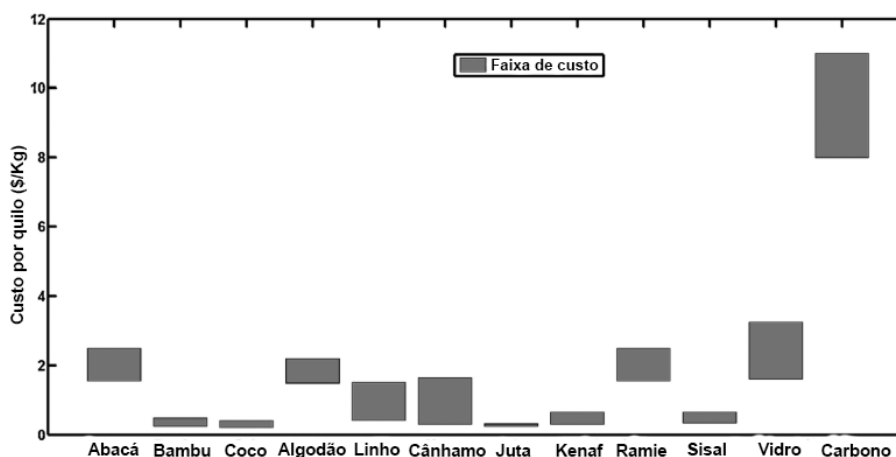
A Tabela 3 mostra as principais vantagens e desvantagens da utilização das fibras naturais em relação às sintéticas.



**Tabela 3.** Vantagens e desvantagem dos compósitos naturais em relação aos sintéticos [29].

Vantagens	Desvantagens
Reciclável	Alta absorção de umidade
Baixa densidade	Instabilidade dimensional
Emissões negativas de CO <sub>2</sub>	Inflamável
Melhores propriedades mecânicas comparando com fibra de vidro	Menor força e resistência térmica comparando com fibras de vidro
Processamento não abrasivo	Comportamento anisotrópico
Não produz componentes tóxicos em seu processamento	Sensibilidade a luz UV, ação microbiana e fungos
Menos energia para sua produção quando comparado com fibra de vidro	Temperatura de processamento limitada quando comparado com fibras de vidro

A características físicas, econômicas e mecânicas de fibras naturais, de acordo com a literatura, têm grande potencial para substituir os sintéticos nos próximos anos. Um exemplo é o estudo realizado por Ahmad, Choi, e Park [4], o qual comparou diversos dados de estudos com compósitos de fibras naturais e compósitos de fibras sintéticas. O autor constatou que, em geral, as fibras naturais são relativamente mais baratas que as sintéticas (Figura 15). A fibra de vidro, a mais comum entre as sintéticas, mesmo sendo a mais barata da categoria, possui alta densidade em relação às fibras naturais (Figura 15), tornando-a pesada e limitando seu uso em certas aplicações.



**Figura 15.** Comparação de custo por peso entre compósitos naturais e sintéticos, adaptado de [4].

A relação entre custo, densidade, modulo de Young e resistência a tração de compósitos e fibras naturais e sintéticas foram comparadas por Ahmad [4] e estão representadas na Figura 16, Figura 17, Figura 18 e Figura 19.

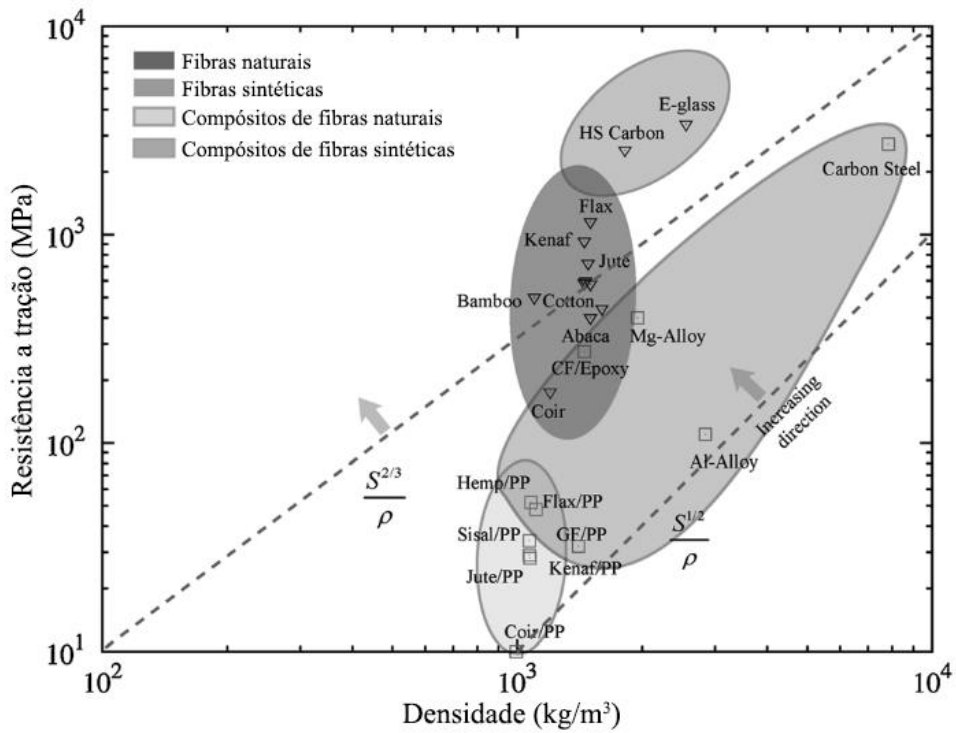


Figura 16. Relação entre limite de resistência a tração e densidade de vários compósitos e suas respectivas fibras, adaptado de [4].

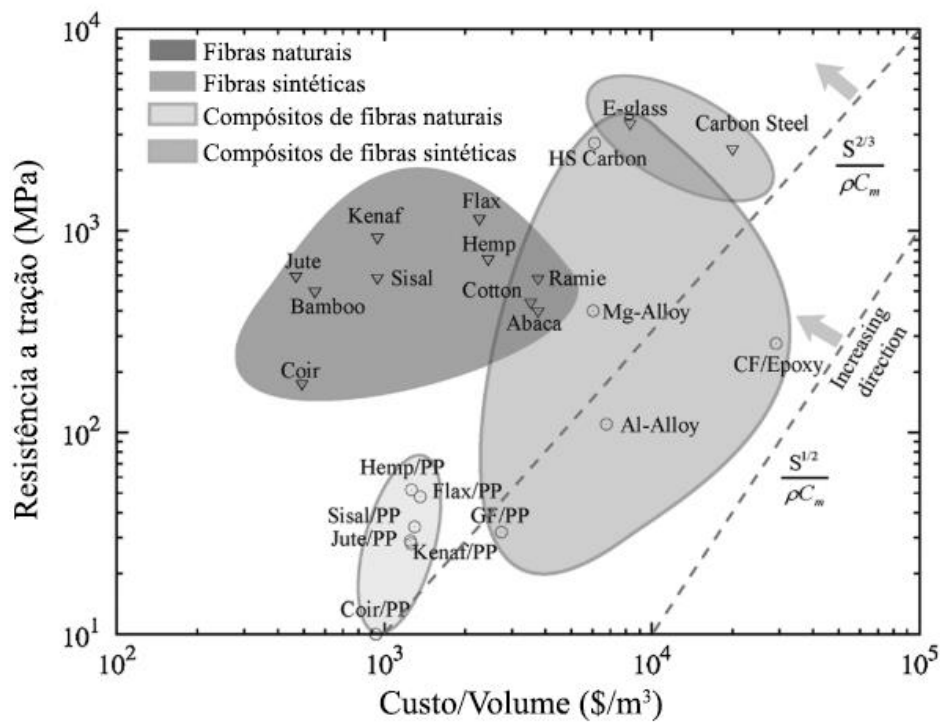


Figura 17. Relação entre limite de resistência a tração e custo por volume de vários compósitos e suas respectivas fibras, adaptado de [4].

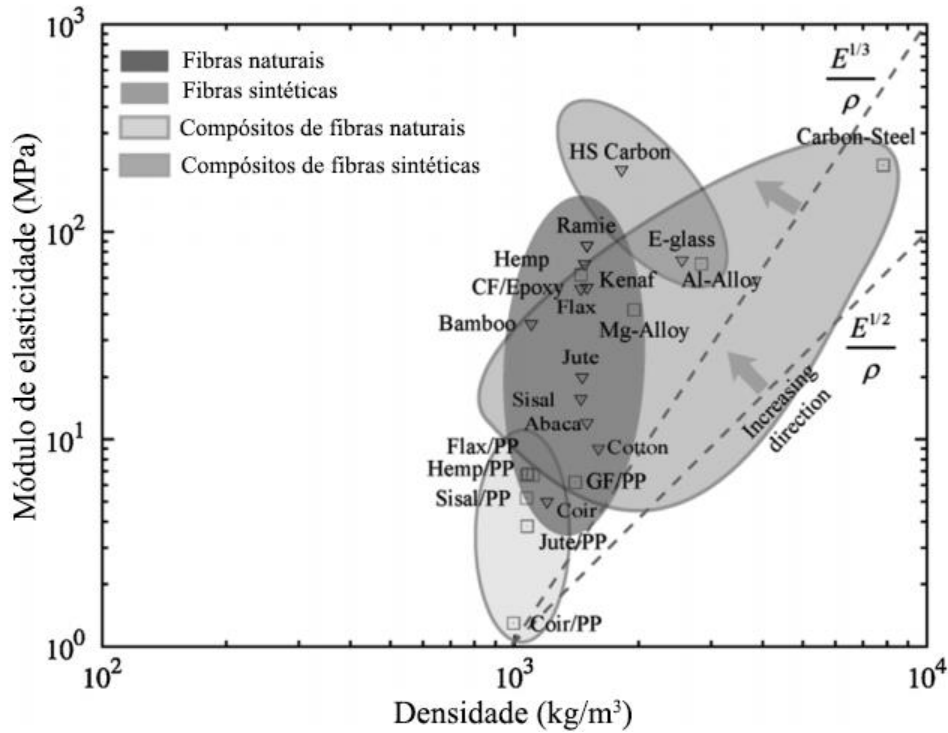


Figura 18. Relação entre módulo de elasticidade e densidade de vários compósitos e suas respectivas fibras, adaptado de [4].

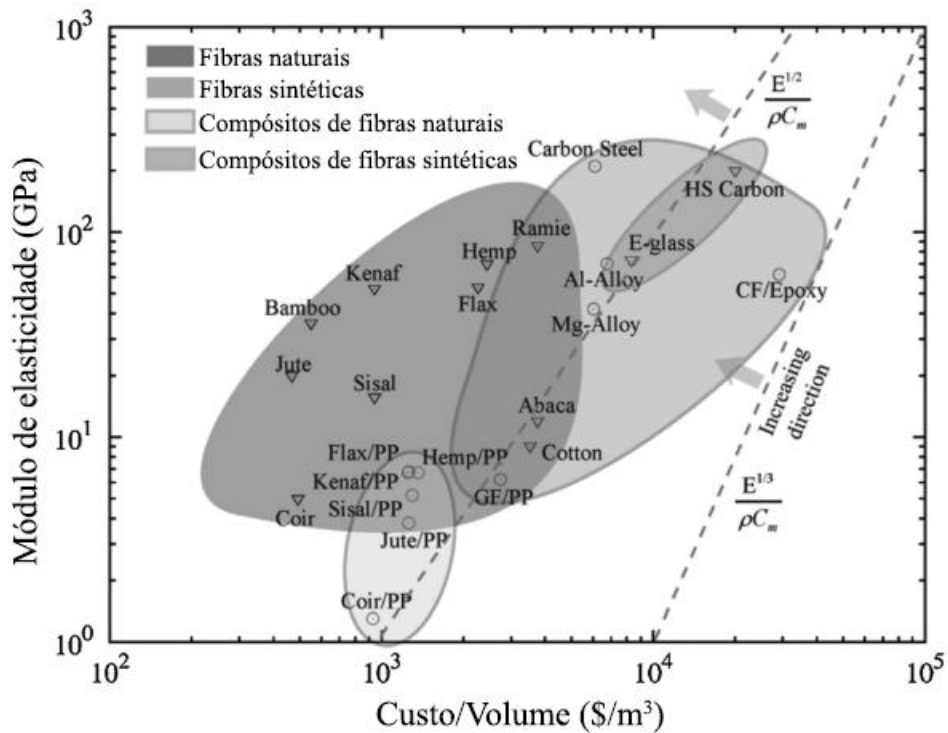


Figura 19. Relação entre módulo de elasticidade e custo por volume de vários compósitos e suas respectivas fibras, adaptado de [4].

### 2.3.2.1 Linho

O linho está entre as espécies de plantas mais antigas cultivadas no mundo. A planta serve de matéria-prima para óleos e fibras, sendo utilizada desde o Egito antigo. Relatos da literatura apontam ainda que os egípcios utilizaram as fibras de linho em tijolos das pirâmides de Dahshur da quarta dinastia, datadas de 3000 a.c., além de possuírem a maior parte dos seus tecidos feitos desse material (Figura 20).

O cultivo da planta é amplamente distribuído na área subtropical do mundo. Na Europa, sua produção é realizada há séculos, a fim de usar suas fibras principalmente para aplicações têxteis [5], [30].



**Figura 20.** Tecidos egípcios confeccionados com linho [31].

Em termos de desempenho mecânico, o linho é um dos mais fortes da família de fibras naturais e é conhecido por ser tão rígido quanto a fibra de vidro. No entanto, devido à falta de informações em relação às propriedades de durabilidade das fibras de linho, como por exemplo seu comportamento à fadiga, seu uso ainda é limitado em aplicações de alto desempenho, como pás de turbinas eólicas e artigos desportivos [32].

O linho (Figura 21) é um membro do gênero *Linum* na família *Linaceae*. Entre as 298 espécies de linho, a mais cultivada é a *Linum usitatissimum* L.: uma planta anual que fornece fibras e sementes ricas em óleo, conhecidas por suas qualidades nutricionais [6].



**Figura 21.** Plantas de linho usadas para produção das fibras[31].

As fibras de linho são extraídas da entrecasca do caule da planta. Em termos botânicos, ela se enquadra como sendo o tecido do floema. Uma planta típica possui dimensões de cerca de 90-120 cm de altura e cerca de 0,15-0,30 cm de diâmetro. A parte útil para a produção das fibras é chamada de caule técnico e varia conforme a planta (Figura 22).

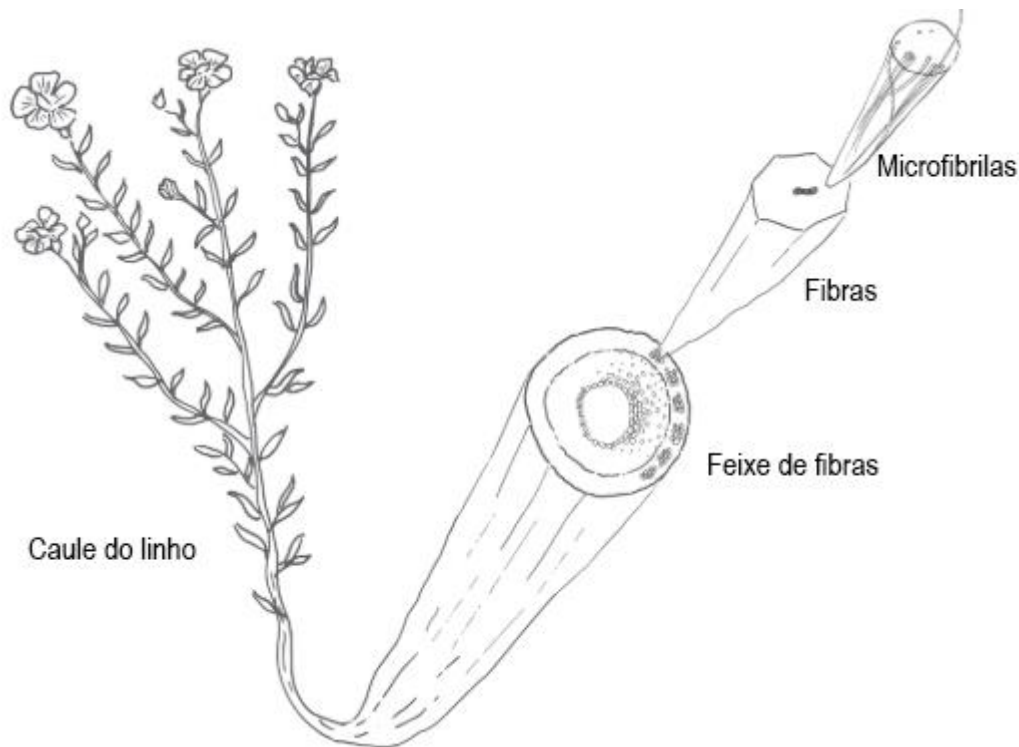


**Figura 22.** Parte do caule que se utiliza para a produção de fibras, adaptado de [5].

A Figura 23 mostra um esquema da estrutura altamente hierárquica que existe na planta linho, o conjunto de fibras, as fibras únicas e as micro fibrilas. As micro fibrilas são uma aglomeração de unidades de micelas que consistem em várias cadeias de moléculas de celulose, unidades de glicose altamente cristalinas ligadas a  $\beta$ -1,4 com um grau de polimerização de 1200 a 1500 [5].

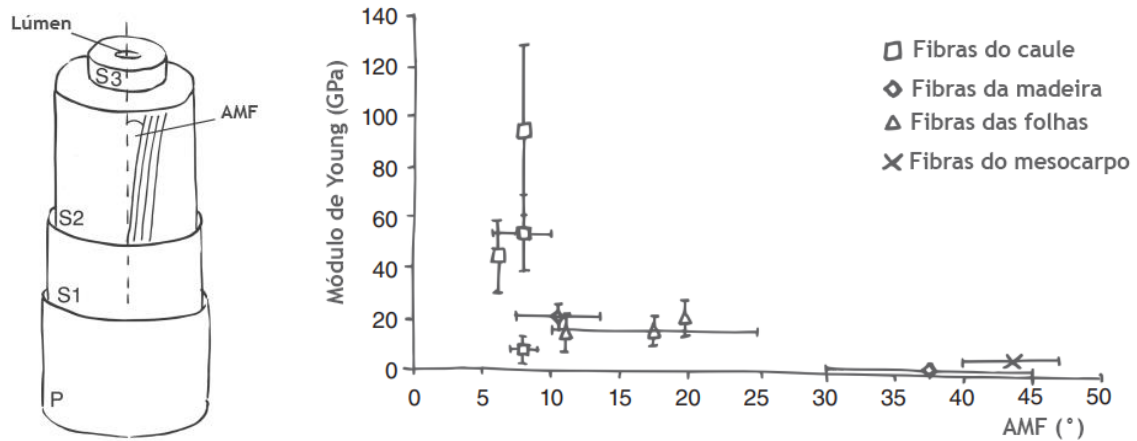
Cada fibra da planta, também chamada de fibras elementares, tem aproximadamente 10 a 25 micron na seção transversal e tem um comprimento de 10 a 25 mm. O número de feixes de fibras no caule varia de 15 a 40 e cada feixe contém de 12 a 40 fibras elementares.

Nas partes mais externas do caule se encontram feixes de fibras que variam entre 30 a 90 cm de comprimento. As fibras de linho que formam o feixe de fibras consistem de várias camadas da parede celular. A Figura 23 ilustra também a localização dos feixes de fibras no caule do linho. [5], [33].



**Figura 23.** Estrutura hierárquica da planta de linho (*Linum usitatissimum* L.). Os feixes de fibras do caule técnico estão localizados na parte externa da haste do linho e consistem em várias fibras de linho, adaptado de [5].

A parede celular da fibra de linho, como para a maioria das fibras vegetais, consiste em diferentes camadas ao redor do lúmen: uma camada primária fina de aproximadamente  $0,2\ \mu\text{m}$  e uma camada secundária fortemente desenvolvida subdividida em três camadas S1 a S3, das quais a camada S2 tem as maiores dimensões (Figura 24). As microfibrilas de celulose e sua disposição nas camadas são responsáveis pela resistência mecânica e rigidez das fibras. Sua orientação é altamente paralela dentro das camadas. O ângulo da orientação da microfibrila em relação ao eixo principal da fibra é o chamado ângulo da microfibrila (AMF) A Figura 24.b apresenta a relação entre o ângulo da microfibrila e o módulo do Young para diferentes fibras vegetais. [5].



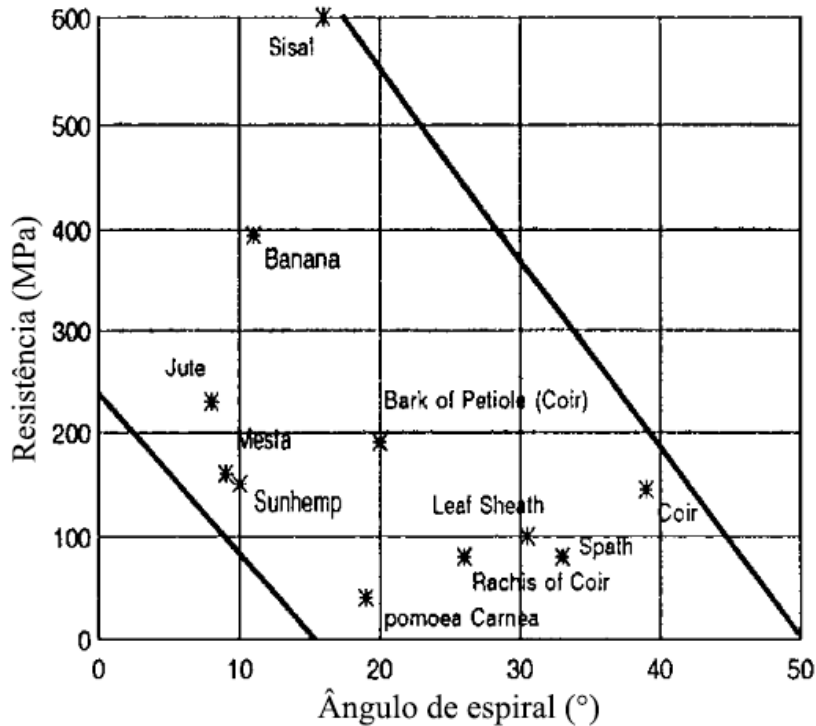
**Figura 24.** (a) Definição esquemática do ângulo de micro fibrilas (AMF) na parede celular secundária de fibras vegetais em relação ao eixo celular; (b) Relação entre ângulo da micro fibrila de tipos de fibras e o módulo seu modulo de Young , adaptado de [5].

De acordo com o gráfico ângulos menores, especificamente entre 6° a 10°, da micro fibrila se correlacionam com altos valores de rigidez. Isso pode ser explicado pela alta orientação das estruturas de celulose de transporte de carga na direção da carga [5]. Nesse sentido as fibras retiradas do caule, como é o caso do linho, são mais eficientes em termos de modulo de Young e resistência a tração por unidade de massa do que outros tipos, pois possui AMF baixos e uma alta presença de celulose em sua composição [6].

A Tabela 4 e a Figura 25 fornece uma visão geral das propriedades físicas e mecânicas, bem como o grau de resistência em relação ao AMF do linho e algumas outras fibras naturais em comparação as fibras mais utilizadas.

**Tabela 4.** Propriedades mecânicas de linho comparadas com fibras sintéticas convencionais, adaptado de [5].

Origem	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Resistência a tração [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Deformação [%]
<b>Linho</b>	<b>1.4</b>	<b>800–1500</b>	<b>60–80</b>	<b>1.2–1.6</b>
Vidro tipo S	2.5	2000–3500	70–73	1.8–3.2
Vidro	2.55	3–3.5	63–67	2.5
Aramida	1.44	3000	124	2.5
Carbono	1.4	400	230–240	1.4–1.8
Carboneto de silício	3.16		360–440	–



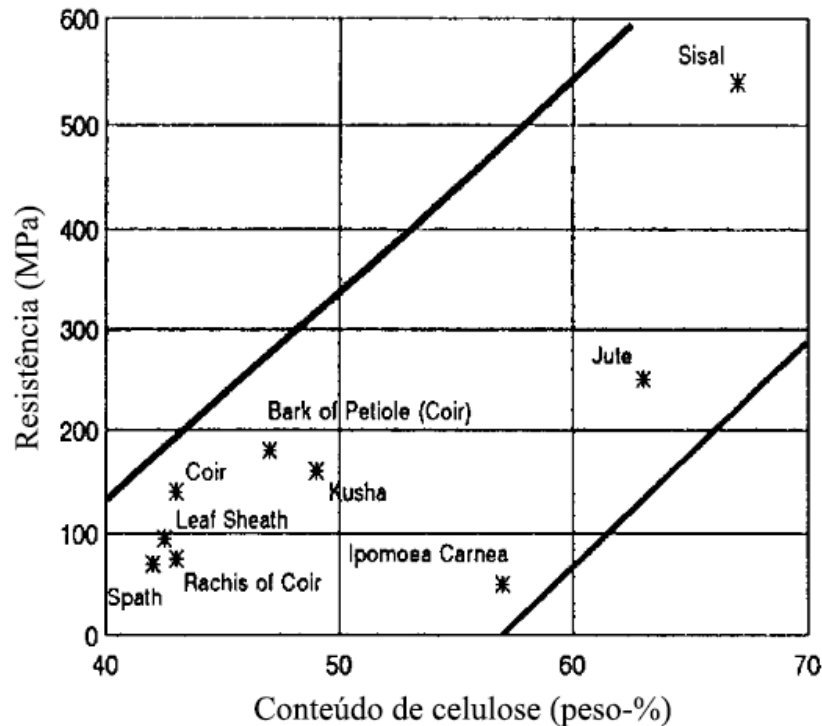
**Figura 25.** Resistências a tração de fibras naturais de acordo com o ângulo da microfibrila, adaptado de[5]

Quando a fibra de linho é utilizada em compósitos, os resultados das propriedades mecânicas do produto final são fortemente influenciados pela composição e interação química da fibra com a matriz, como já mencionado em sessões anteriores desse trabalho. Sendo assim, a Tabela 5 mostra a média composição química das fibras de linho em comparação com outras fibras incluindo o sisal [34].

**Tabela 5.** Composição química de diferentes fibras lignocelulósicas, adaptado de [34].

	<b>Algodão</b>	<b>Juta</b>	<b>Linho</b>	<b>Rami</b>	<b>Sisal</b>
Celulose	82.7	64.4	64.1	68.6	65.8
Hemi-celulose	5.7	12	16.7	13.1	12
Pectina	5.7	0.2	1.8	1.9	0.8
Lignina	—	11.8	2	0.6	9.9
Solúvel em água	1	1.1	3.9	5.5	1.2
Cera	0.6	0.5	1.5	0.3	0.3
Água	10	10	10	10	10





**Figura 26.** Resistências a tração de fibras naturais de acordo com o conteúdo de celulose, adaptado de [5].

**Linho Norte:** O linho que é utilizado nos ensaios do Capítulo 3 é uma categoria de linho tradicional de Portugal, chamado linho polido e popularmente de “fio norte” ou “ fio de vela”, esses fios possuem uma camada de cera aplicada para fornecer dureza ao fio, por isso são recomendados para serem utilizados em embalagem, na indústria alimentar, em calçados e na indústria têxtil [35], [36].

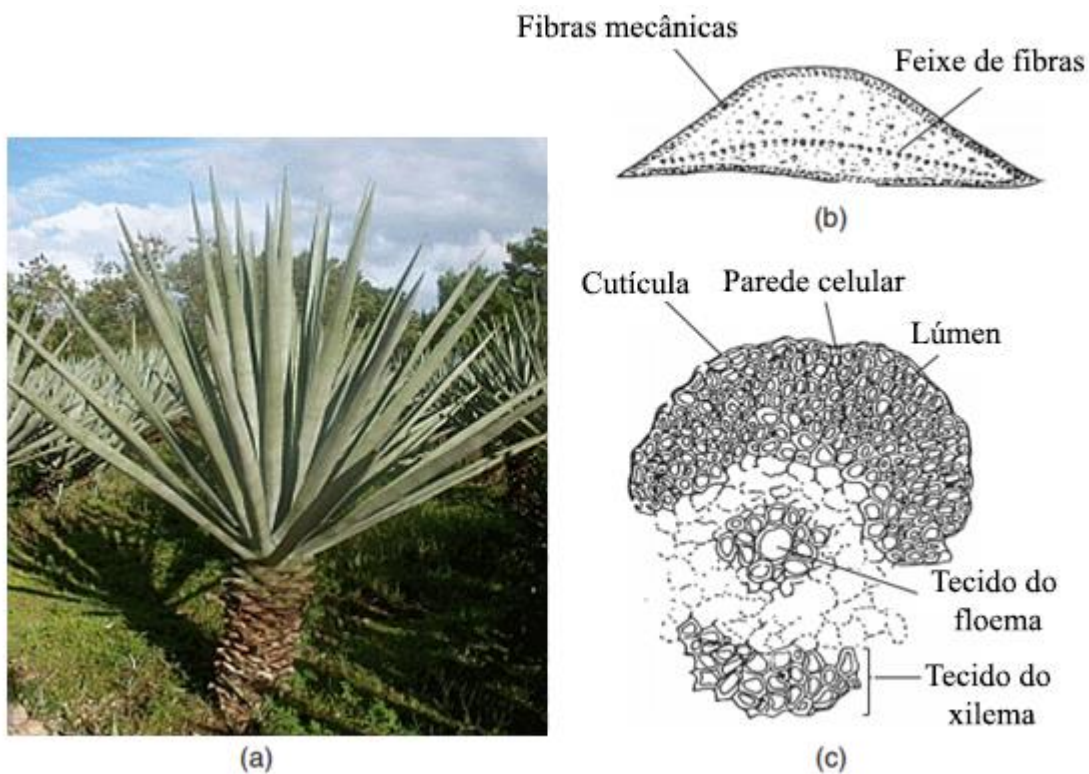
#### 2.3.2.2 Sisal

As fibras de sisal são produzidas através das folhas da planta *Agavesisalana*, originária do México e atualmente cultivada em diversas regiões pelo mundo. O nome "sisal" vem de uma cidade portuária em Yucatan, Maya, México. Tendo como significado “água fria” atribuído pelos nativos da região. As plantas de agave foram cultivadas pelos índios maias antes da chegada dos europeus. Eles prepararam as fibras à mão e as usaram para cordas, tapetes e roupas. [12], [37].

Quase 4,5 milhões de toneladas anuais de sisal são produzidas no mundo. A maior parte dessa produção e exportação é realizada pelo Brasil com uma taxa anual de 151,6 milhares de toneladas em 2015, sendo responsável por 51% da produção mundial seguido da China (15%) e da Tanzânia (12%).

As fibras de sisal podem ser extraídas das plantas depois de dois anos de cultivo. Uma boa planta de sisal produz cerca de 200 folhas e cada folha é composta em massa por 4% de fibra, 0,75% de cutícula, 8% de outras matérias secas e 87,25% de umidade. Para extração dessas fibras as folhas são escovadas, batidas e esmagadas por um dispositivo com facas não afiadas, restando apenas as fibras ao final do processo.

A Figura 27.a é uma fotografia de planta de sisal típica e a Figura 27.b mostra um esboço da seção transversal da folha de sisal. Três tipos de fibras podem ser extraídos das folhas de sisal, incluindo fibras mecânicas, de fita e de xilema. As fibras mais úteis comercialmente (tecnicamente) são extraídas da periferia da folha. As fibras de fita são as fibras mais longas que podem ser obtidas a partir da linha mediana da folha. A estrutura de tecido condutora relacionada das fibras da fita fornece uma considerável força mecânica. As fibras de xilema são compostas de células de paredes finas, como mostrado na Figura 27.c e, portanto, são facilmente perdidas durante o processo de extração [38], [39].



**Figura 27.** (a) Planta de sisal; (b) Sessão transversal de uma folha de sisal; (c) Sessão transversal de um conjunto de fibras, adaptado de [39].

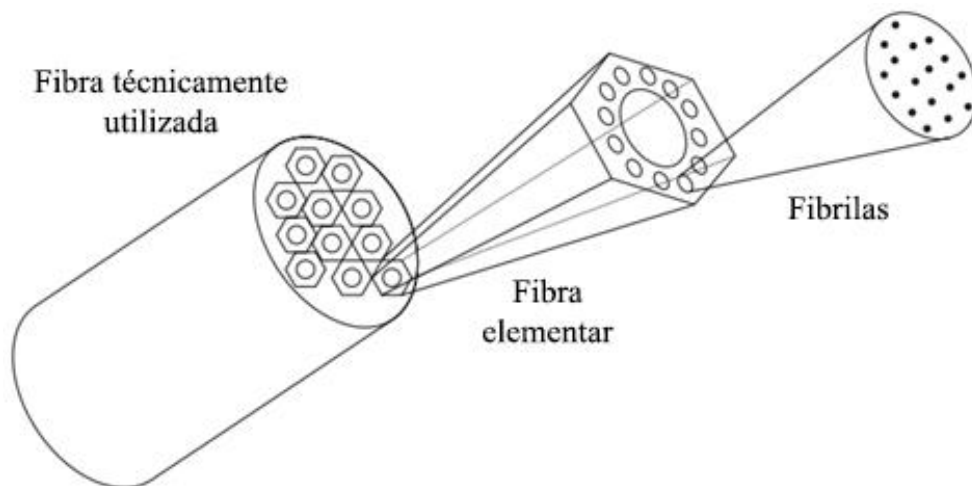
De acordo com [39] a fibra de sisal consiste em 67-78% de celulose, 10-14.2% de hemiceluloses, 8-10% de lignina, 2% de ceras, 1% de cera, 1% de cinza e 1% de água. Possui

também um AMF entre 10° a 22°. Na Tabela 6 pode-se ver as propriedades físicas e mecânicas da fibra de sisal comparados com fibras sintéticas convencionais.

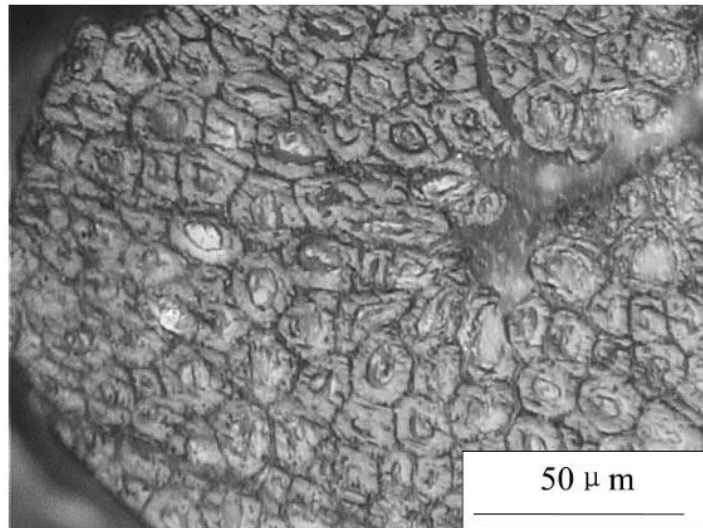
**Tabela 6.** Propriedades mecânicas de sisal comparadas com fibras sintéticas convencionais, adaptado de [22].

Origem	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Resistência a tração [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Deformação [%]
Sisal	1.3–1.4	390–450	12–41	2.3–2.5
Vidro tipo S	2.5	2000–3500	70–73	1.8–3.2
Vidro	2.55	3–3.5	63–67	2.5
Aramida	1.44	3000	124	2.5
Carbono	1.4	400	230–240	1.4–1.8
Carboneto de silício	3.16		360–440	–

A estrutura da fibra de sisal é semelhante a do linho abordado anteriormente, pois segue uma hierarquia começando com a fibra tecnicamente usada, a fibra elementar e as fibrilas, como pode ser vista nas Figura 28 e Figura 29.

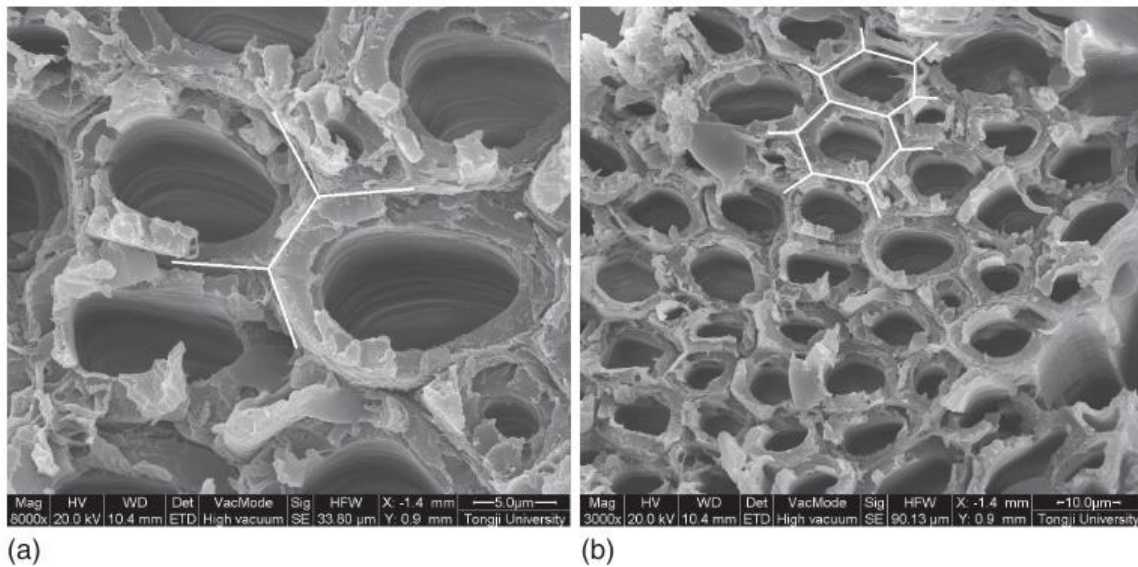


**Figura 28.** Escala hierárquica de estruturas em uma fibra de sisal, adaptado de [39]



**Figura 29.** Organização das paredes celulares na sessão transversal de uma fibra de sisal [39].

Segundo Li and Shen [39], uma característica peculiar nesse tipo de fibra é sua geometria. As junções vizinhas de sua micro estrutura se conectam e formam uma rede topológica invariável conhecida como árvore Steiner com simetria angular de  $120^\circ$  como pode ser visto na Figura 30 .



**Figura 30.** Junção de três vias com simetria de  $120^\circ$  e (b) o anel formado por árvores Steiner [39].

## 2.4 TIPOS DE POLÍMEROS

De acordo com Groover [10] um polímero é um composto formado pela repetição de unidades estruturais chamadas meros, cujos átomos se unem para formar moléculas muito grandes. Os polímeros geralmente consistem em átomos de carbono ligados a outros elementos, como hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e cloro. Os polímeros são divididos em três categorias: polímeros termoplásticos, polímeros termoendurecíveis e elastômeros. No entanto, a classe de elastômeros não será abordada nesse trabalho.

Nos compósitos com fibras naturais, utiliza-se amplamente tanto as matrizes de natureza termoendurecíveis, como no caso de poliésteres insaturados, epóxis e fenólicos, quanto termoplásticos como polipropilenos e polietilenos. Contudo, as suas características físicas e químicas são diferentes bem como sua reatividade com a superfície das fibras. A Tabela 7 apresenta um resumo das principais vantagens e desvantagens de cada tipo de matriz polimérica.

**Tabela 7.** Comparação de vantagens e desvantagens entre polímeros termoplásticos e termoendurecíveis, adaptado de [25].

	Vantagens	Desvantagens
<b>Termoendurecíveis</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixa viscosidade</li> <li>- Bom umedecimento em fibras</li> <li>- Excelente estabilidade térmica pós polimerizados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Frágil</li> <li>- Não reciclável por técnicas convencionais</li> <li>- Não modelável após cura</li> </ul>
<b>Termoplásticos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reciclável</li> <li>- Fácil de reparar por soldagem ou por solventes</li> <li>- Pode ser remodelado</li> <li>- Resistente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo ponto de fusão</li> <li>- Precisa ser aquecido acima do ponto de fusão para ser processado</li> </ul>

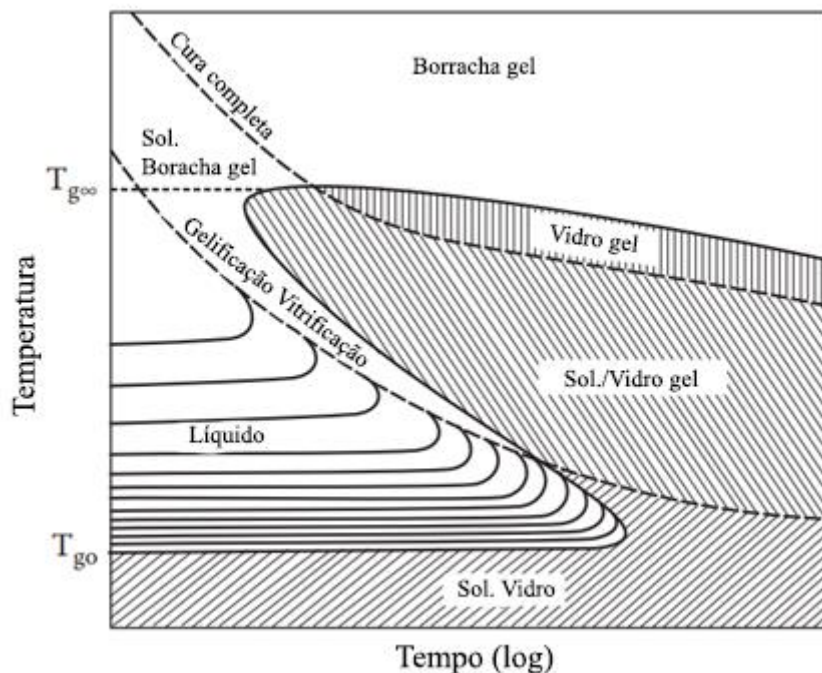
### **2.4.1 Polímeros termoplásticos**

Essa classe de polímeros tem a característica de poder ser submetido a vários ciclos de aquecimento e resfriamento sem alterar substancialmente sua estrutura molecular. Apesar de esse tipo não ser o foco do presente trabalho os materiais plásticos estão sendo cada vez mais estudados para a aplicação em compósitos. Um exemplo disso é o trabalho realizado por Sawpan [40] que confeccionou e testou compósitos com cânhamo/ácido polilático (PLA) comparando-os com matrizes termorrígidas. O PLA é um polímero bastante utilizado e estudado atualmente, principalmente para a prototipagem de equipamento e manufatura aditiva. Termoplásticos comuns incluem polietileno, poliestireno, cloreto de polivinil e nylon [10].

### **2.4.2 Polímeros termoendurecíveis**

Quando as moléculas de um polímero são reticuladas na forma de uma rede, elas não amolecem com o aquecimento. Chama-se esses polímeros reticulados de polímeros termoendurecíveis. Os polímeros termoendurecíveis se decompõem no aquecimento. A reticulação faz com que o deslize entre moléculas seja dificultado, tornando o polímero forte e rígido [3].

A cura de uma resina termorrígida é um processo bastante complexo que pode ser definido como a mudança nas propriedades químicas e físicas de uma determinada formulação resina/endurecedor. Estas mudanças ocorrem irreversivelmente, por intermédio de reação química, usualmente acompanhada pela ação de calor e sob condições variadas de pressão e vácuo. A gelificação e a vitrificação são os dois fenômenos macroscópicos mais importantes que ocorrem durante a cura de sistemas termorrígidos, como pode ser visto no diagrama da Figura 31 [41].

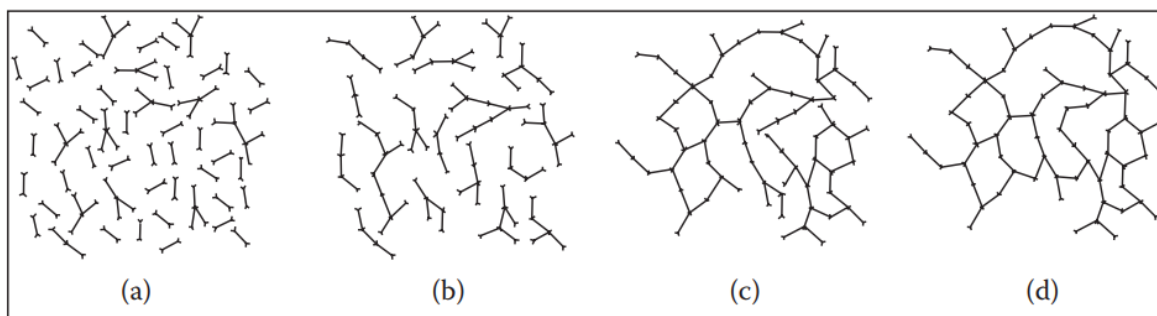


**Figura 31.** Diagrama de transformação Tempo-Temperatura em termorrígidos, adaptado de [41].

A gelificação corresponde à formação incipiente de uma rede de peso molecular infinito, onde a viscosidade à taxa de corte tendendo a zero também se torna infinita, dando origem ao comportamento viscoelástico do fluido. O sistema passa de um líquido viscoso à um gel elástico. Após a gelificação, o processo de cura continua mais lentamente, porque a mobilidade do sistema fica mais restrita devido ao aumento da densidade de ligações cruzadas. Esse aumento do número de ligações cruzadas provoca um acréscimo na temperatura de transição vítrea e nas propriedades mecânicas do material [41].

A vitrificação é a formação de um sólido vítreo a partir de um monômero, ou seja, é o processo no qual a reação química é resfriada durante o ciclo de cura, sendo que a resina não atinge o estado de cura total [3].

O desenvolvimento de uma rede interligada durante a cura de um polímero termoendurecível é ilustrado na Figura 32. À medida que a temperatura e o tempo aumentam, a interconectividade da rede aumenta de acordo com as etapas ilustradas: (a) o pré-polímero e os agentes de cura são misturados; (b) o peso molecular do polímero (tamanho) aumenta; (c) ocorre a gelificação, e uma rede contínua é obtida; e (d) o processo de cura é finalizado [42].



**Figura 32.** Etapas de cura de um termopoliuretano [42].

Depois que o polímero se aproxima da vitrificação (isto é, o polímero muda de um estado emborrachado para um vítreo), a taxa de conversão diminui significativamente. Se a vitrificação ocorrer antes da conclusão da reação correta, as propriedades do polímero não serão totalmente alcançadas e poderão ocorrer vazios no laminado. Esses fenômenos devem ser considerados no desenvolvimento de um ciclo de cura apropriado [42].

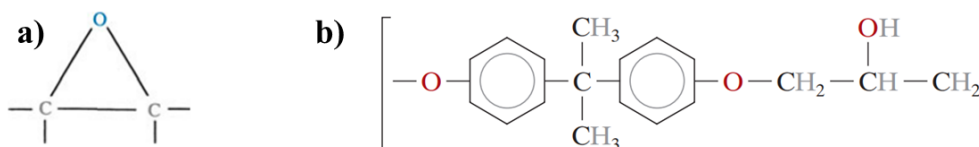
Entre as diferentes matrizes termopoliuretânicas, epóxis e poliésteres são as mais utilizadas por isso serão abordadas nesse texto.

#### 2.4.2.1 Epóxi

Este é um dos principais materiais utilizados em matrizes termopoliuretânicas. Um epóxi é um polímero que contém um grupo epóxido (um átomo de oxigênio e dois átomos de carbono) em sua estrutura química (Figura 33.a), como por exemplo o éter diglicídico do bisfenol A (DGEBA) (Figura 33.b), que é o mais utilizado e é produzido pela reação da epocloridrina com o bisfenol-A na presença de um catalisador básico.

As propriedades dessa classe de polímeros dependem da combinação específica do tipo de resinas epóxi e agentes de cura usados. Os agentes de cura são compostos orgânicos de aminoácidos ou ácidos. A reticulação desejada é obtida através da introdução de produtos químicos que reagem com os grupos epóxi e hidroxil entre as cadeias adjacentes. A extensão da reticulação é uma função da quantidade de agente de cura adicionada. Um agente de cura comum para o epóxi DGEBA é a dietilenotriamina (DETA). Em geral, características como rigidez, resistência e temperatura de transição vítrea aumentam com o aumento da reticulação, mas a tenacidade diminui.





**Figura 33.** (a) Estrutura química do grupo epóxico; (b) Estrutura de repetição do éter diglicídico do bisfenol A (DGEBA) [2], [3].

Devido às suas excelentes propriedades mecânicas, alta adesividade a muitos substratos e boas resistências químicas e ao calor, atualmente as resinas epóxi são intensivamente usadas em uma ampla gama de campos, onde atuam como materiais reforçados com fibras, adesivos de uso geral, revestimentos de alto desempenho e materiais encapsulantes [43].

Apesar de mais caro o epóxi apresenta propriedades mecânicas superiores quando comparado ao poliéster, além de oferecer maior resistência à umidade, menor retração na cura (cerca de 3%) e liga-se bem à reforços de fibras utilizados atualmente. Em compósitos que utilizam epóxi a reação de polimerização para transformar a resina líquida no sólido é induzida pela adição de pequenas quantidades de um agente reativo imediatamente antes da incorporação de fibras na mistura líquida. Algumas das principais características desse tipo de resina pode ser visto na Tabela 8 [3], [44].

**Tabela 8.** Algumas das principais características do epóxi em geral, adaptado de [3].

Densidade (g cm <sup>-3</sup> )	Resistênci a (MPa)	Módulos de Young (GPa)	Razão de Poisson	Encolhimento na cura (%)	Temperatura de serviço(° C)
1.2-1.3	50-125	2.5-4	0.2-0.33	1-5	120

#### 2.4.2.2 Poliéster não saturado

O poliéster não saturado é uma resina termoendurecível comumente usada como material de matriz em compósitos poliméricos. Essa resina, comumente chamada apenas de poliéster, possui estrutura amorfa e é obtida por condensação de um ácido dibásico insaturado e um glicol (geralmente polipropileno glicol). Polímeros desse tipo possuem várias ligações duplas C = C resultando em um composto linear que contém ligações duplas entre certos átomos de carbono [45].

O termo não saturado significa que existem locais reativos na molécula. Diluentes como o estireno são usados para reduzir a viscosidade do poliéster. Geralmente, são adicionados agentes de endurecimento e cura e absorventes de ultravioleta. Frequentemente,

um catalisador como peróxido orgânico é adicionado para iniciar a ação de cura. Pode-se acelerar o processo de cura aumentando a temperatura e isso aumenta a taxa de decomposição do catalisador. As resinas de poliéster encolhem entre 4 e 8% na cura.

O poliéster insaturado possui resistência a água e uma variedade de produtos químicos, suporta temperaturas de até 80 ° C e é uma alternativa barata em comparação com outras resinas. A Tabela 9 fornece algumas propriedades importantes da temperatura ambiente do poliéster.

**Tabela 9.** Algumas das principais características do poliéster em geral, adaptado de [3].

Densidade (g cm <sup>-3</sup> )	Resistênci a (MPa)	Módulos de Young (GPa)	Razão de Poisson	Encolhimento na cura (%)	Temperatura de serviço(° C)
1.1-1.4	30-100	2-4	0.2-0.33	5-12	80

Existe uma confusão infeliz sobre o termo poliéster. O mesmo termo é usado para dois polímeros muito diferentes. O poliéster não saturado é uma resina termoendurecível comumente usada como material de matriz em compósitos poliméricos. No entanto, também é chamado de poliéster o poliéster termoplástico que é na verdade tereftalato de polietileno ou PET, possuindo propriedades muito diferente do poliéster não saturado. Este último encontra usos extensos em produtos como barcos reforçados com fibra de vidro, tubulações, chuveiros, etc. No caso do PET é usado extensivamente para produzir fibras, filmes e garrafas de água e refrigerante [3].

## 2.5 TRATAMENTOS QUÍMICOS

As fibras naturais não estão totalmente livres de problemas, embora tenham a vantagem comparativa de baixo custo e baixa densidade sobre outras fibras. As fibras naturais têm características polares fortes, o que pode causar um problema de incompatibilidade na ligação com a maioria das matrizes poliméricas, os processos de tratamento químico de superfície aumentam o custo das fibras naturais, mas podem melhorar a propriedade de adesão da interface entre a fibra e a matriz e também diminuir a absorção de água pelas fibras. Portanto, os tratamentos químicos podem ser considerados como modificadores das propriedades das fibras naturais. Alguns tratamentos químicos para fibras naturais estão listados abaixo [4]:

1. Tratamento alcalino (NaOH);
2. Tratamento com silano;
3. Acetilação de fibras naturais;
4. Tratamento de benzoilação;
5. Acrilação e enxertia de acrilonitrila;
6. Agentes de acoplamento maltratados;
7. Tratamento de permanganato;
8. Tratamento com peróxido;
9. Tratamento com isocianato;
10. Eterificação de fibras naturais;
11. Acrilação, hidróxido de maleico e tratamento com titânio de fibras naturais;
12. Tratamento com plasma;
13. Tratamento com clorito de sódio de fibras naturais.

Apesar da existência de diferentes tratamentos químicos, o presente trabalho utilizou-se apenas dos tratamentos alcalino e com silano, pois segundo a literatura, compósitos epóxi reforçados com fibra tratada com esses procedimentos mostram melhor resistência à tração em comparação com fibra não tratada porque o material de cimentação presente nas fibras, nomeadamente a lignina e a hemicelulose, é removido com NaOH e, portanto, ocorre um aumento na área superficial da fibra. Devido a isso, uma melhor adesão entre os fibra e matriz ocorrem e isso aumenta a resistência à tração do compósito. O mesmo ocorre com o silano o qual melhora o grau de reticulação na região da interface e aumenta a área de superfície da fibra, permitindo uma ligação mais forte entre a fibra e a matriz [46], [47].

Relatos da literatura apontam que combinação dos dois tratamentos em compósitos de linho e epóxi podem levar a um aumento de 40 e 60%, em relação à resistência à flexão longitudinal e rigidez, respectivamente [48].

### 2.5.1 Tratamento alcalino

O tratamento alcalino envolve a imersão das fibras em uma solução alcalina, frequentemente a do NaOH, por um período de tempo. Acredita-se que ele funcione aumentando a rugosidade da superfície da fibra, o que melhora a ligação mecânica. Também expõe mais celulose na superfície da fibra a potenciais ligações químicas com o material da matriz. Testes realizados relataram aumentos de até 50% na resistência à tração e no módulo de elasticidade de fibras de banana e epóxi, no caso com fibras de linho e sisal esse aumento chegou em torno de 30% [48]–[51].

Estudos a respeito das propriedades de tração e flexão realizados com compósitos de fibra de sisal e epóxi mostraram que as concentrações de 2% e 5% de NaOH obtiveram

melhores resultados nas propriedades mecânicas do material, seguidas pela concentração de 10%. Valores superiores de concentração levam a uma queda nas propriedades mecânicas do material, pois ocorre degradação das fibras [47], [52].

Os compósitos de fibra tratada com NaOH a 2% melhoraram a resistência à tração e o módulo de tração em 46% e 36%, respectivamente, em comparação com os compósitos de fibra não tratados. No caso de concentrações de 5%, a resistência à tração e o módulo de tração também foram aumentados em 31% e 26%, respectivamente [52].

### **2.5.2 Tratamento com silano**

O tratamento com silano geralmente envolve aplicar às fibras uma solução fraca de um silano diluído em uma mistura de água / álcool ou água / cetona. Na presença de água, o silano se decompõe em silanol e álcool. O silanol reage com os grupos OH da celulose em fibras naturais, formando ligações covalentes estáveis às paredes celulares que são quimicamente absorvidas na superfície da fibra. O uso de silano ajuda a melhorar o grau de reticulação da interface e aumenta a área superficial da fibra, aumentando a compatibilidade química entre matriz e fibra[53].

Testes realizados por [48] apontaram que fibras de linho embebidas por 2 h em uma solução a 1% de três-aminopropiltrimetoxi-silano (APS) diluída em uma mistura 50/50 de acetona e água, tiveram o módulo de elasticidade aumentado aproximadamente 45% em comparação com o composto de fibras não tratadas. Porém a resistência a tração melhorou em apenas cerca de 4%. No caso de compósitos com fibras de sisal e epóxi, a literatura aponta um aumento de resistência à flexão em 18% e módulo de flexão em 21% [54].

## 2.6 COMPÓSITOS DE FIBRA NATURAL E POLÍMEROS

As propriedades mecânicas de compósitos de fibras naturais e epóxi podem ser conferidas pela Tabela 10.

**Tabela 10.** Propriedades mecânicas de compósitos de fibras naturais e epóxi, adaptado de [44].

<b>Compósitos</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Resistência à flexão (MPa)</b>	<b>Resistência ao impacto (kJ / m<sup>2</sup>)</b>
Coir-epoxi	23.68	46.63	26.43
Sisal-epoxi	37.4	52.8	56.7
Juta-epoxi	43	55.8	65
Banana-epoxi	59	76.53	149.66
Baggase-epoxi	42.4	56.7	110.66
Linho-epoxi	59.85	75.4	191.71
Areca-epoxi	27.5	25	93.33
Rami-epoxi	90	110	105.4
L. camara-epoxi	19.08	55.45	32.3
Pseudo caule da banana-epoxi	45.57	73.58	92.66
Groundnutshell-epoxi	18.09	28	24.17
A casca de arroz-epoxi	23	29	26
Coir medula-epoxi	9	23	18.67
Banana + sisal-epoxi	25	62	98.66
Luffa + Groundnut-epoxi	39.31	58.95	27.33

A Tabela 11 traz um resumo dos principais resultados quando se utiliza tratamentos químicos a base de NaOH nas fibras lignocelulósicas em compósitos poliméricos. Em geral, há uma melhora significativa nas propriedades mecânicas, tornando esse método indispensável para a confecção de compósitos de alto desempenho [55].

**Tabela 11.** Comparação das propriedades mecânicas de compósitos com fibras naturais tratadas com NaOH em relação as não tratadas [55].

Compósitos	Tratamento aplicado	Resultados nas propriedades mecânicas
Blend amido de milho/policaprolactana + fibras de curauá	10% e 15% NaOH, temperatura ambiente, 2h	2 vezes e 3 vezes, respectivamente de resistência à fratura em tração
Epóxi + fibras de linho	5% NaOH, temperatura ambiente, 30 min	Aumento de resistência à tração em 21,9% e à flexão de 16,1%
Epóxi + fibras de sisal	2% NaOH, 4h, 60 °C	15% aumento na resistência à tração; Aumento de resistência em tração e flexão e módulo de elasticidade
Resina de proteína de soja + fibras de sisal	NaOH 2M, 2h, temperatura ambiente, sob tração (0,5 Kg/m <sup>3</sup> )	12,2% de fratura em tração e 36,2% em rigidez
Epóxi + fibras de sisal	1% NaOH, 30 min, temperatura ambiente, sob tração 5 N	Aumento de 42% em resistência à flexão e 52% de módulo de elasticidade
Epóxi + juta	2% NaOH, 30 min, temperatura ambiente, sob tração 5 N	Aumento de 17% em resistência à flexão e 25% de módulo de elasticidade

## 2.7 ENSAIOS MECÂNICOS

Conforme descrito por Müssig [5], vários parâmetros influenciam as propriedades finais em testes de compósitos, sendo estes:

1. Velocidade de teste;
2. A área da seção transversal;
3. O comprimento do medidor;
4. O número de amostras testadas;
5. O tipo do componente (ou seja, fibra ou feixe de fibras) sendo testada.

Por esse motivo, o presente trabalho utilizou valores baseados na norma D3039/D3039M e D790 para os parâmetros citados anteriormente, com a ressalva de que os

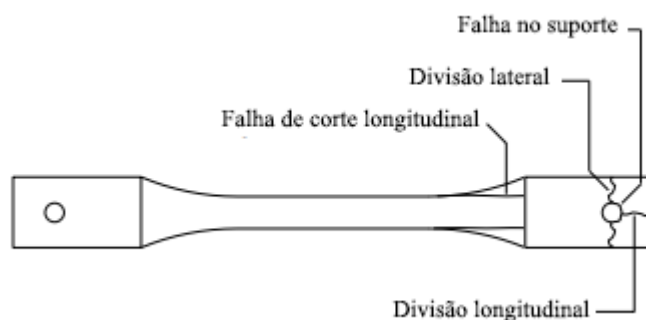
experimentos foram profundamente afetados e adaptados devido ao período em que ocorreram, como citado no início do trabalho.

### 2.7.1 Ensaio de tração

Neste ensaio, o objetivo é determinar o módulo de elasticidade, resistência à tração, limite de ruptura e o coeficiente de Poisson. Essas são propriedades mecânicas primárias necessárias para o planejamento de diversos materiais. De maneira geral as propriedades podem ser analisadas quando a carga é aplicada em ângulos de  $0^\circ$  e  $90^\circ$  em relação a orientação das fibras [56].

#### 2.7.1.1 Preparação dos provetes

O teste basicamente utiliza-se da geometria dos provetes e dos dados da carga aplicada para extrair dados do material. Sendo assim é necessário garantir que a amostra falhe na seção válida, de modo que não prejudique a composição dos dados durante o ensaio. Vários tipos de provetes padrão foram propostos na literatura, no entanto para materiais isotrópicos e materiais com baixa simetria em relação aos seus planos ortogonais (baixa ortotropia), são necessários espécimes em forma de osso de cão ou em forma de sino mudo, ou seja, amostras com largura cônica como por exemplo a da ASTM D 638 (Figura 34) [56].



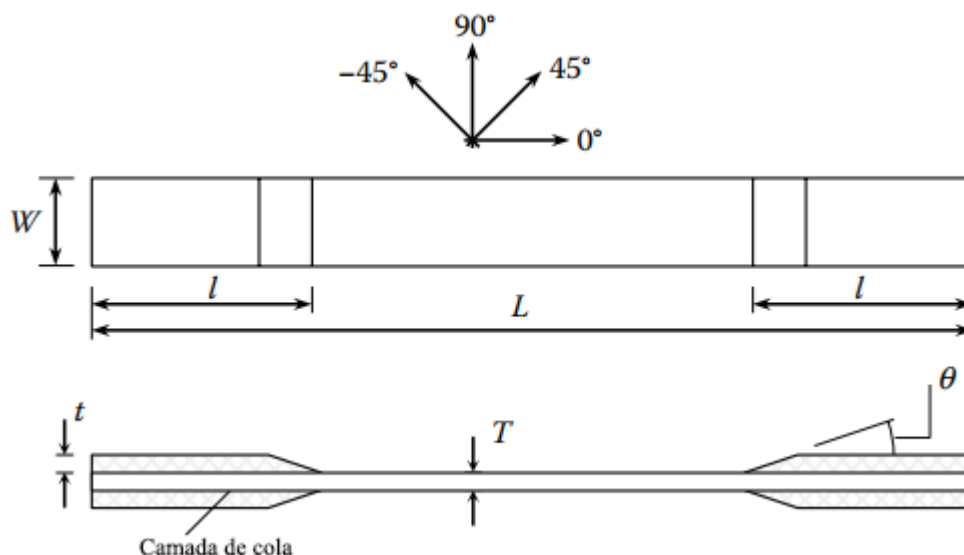
**Figura 34.** Exemplo provete em formato de osso de cão com possível fratura indesejada, adaptado de [56].

A aplicação da carga pode ser feita com a ajuda de um pino através de um orifício em qualquer extremidade da amostra. No entanto, como citado por Buragohain [56], em materiais com alta simetria em relação aos seus eixos ortogonais, tensões altamente localizadas podem se desenvolver ao redor dos furos podendo assim ocorrer falhas na região do rasgo. Por isso nesse trabalho utilizou-se da geometria retangular para a confecção dos provetes.

Entre as normas mais utilizadas para os procedimentos de teste em compósitos estão: ASTM D3039, BS2782, ISO 527 e CRAG. Sendo a ASTM D3039 a norma com maior aceitação e uso. A amostra padrão conforme ASTM é de configuração retangular simples. Dependendo do tipo de material, as guias finais podem ou não ser fornecidas. As dimensões recomendadas do regime estão descritas na Figura 35.

<b>Tipo de material</b>	<b>Unidirecional (0°)</b>	<b>Unidirecional (90°)</b>	<b>Balancedo e simétrico</b>	<b>Aleatório e descontínuo</b>
Comprimento geral	250	175	250	250
Largura	15	35	25	25
Espessura	1	2	2.5	2.5
Comprimento da aba	56	25	a	a
largura da aba	1.5	1.5	a	a
espessura da aba	7-90	90	a	a

a – Uso de lixas para as abas



**Figura 35.** Dimensões recomendadas para provetes pela norma ASTM D3039, adaptado de [56], [57].

As linguetas são usadas para ajudar na transferência da força pelas garras de fixação para a amostra. Elas também protegem as fibras externas da peça contra as força de aperto da máquina. Além disso o seu formato fornece uma superfície de atrito mais alta e, assim,



consequentemente é necessária menor força de aperto nas extremidades dos provetes. A norma também recomenda ângulos de chanfro entre 7 e 90° para compósitos unidirecionais a 0°.

O alinhamento adequado das fibras é extremamente importante para obter as propriedades elásticas corretas. Desalinhamento das fibras em relação ao eixo da amostra pode resultar na redução da resistência à tração de um compósito unidirecional em cerca de 30% [56].

#### 2.7.1.2 Procedimentos para teste e cálculos

É importante, antes da montagem da amostra na máquina, medir com precisão a área da seção transversal da mesma e o seu comprimento. A amostra é então montada na máquina de teste, colocando as duas extremidades nas garras da máquina. Um extensômetro é usado para registrar o alongamento da amostra. Um extensômetro biaxial é montado na seção de medida da amostra para registrar deslocamentos axiais e laterais. Como alternativa, os extensômetros de 0°/90° são coladas na amostra para registrar diretamente as deformações. Quando possível colar os extensômetros em ambos os lados pois isso ajuda a verificar a presença de qualquer flexão durante o ensaio. Quando a razão de Poisson não se destina a ser determinada, o extensômetro uniaxial ou o extensômetro longitudinal são suficientes [56].

Deve-se tomar o máximo cuidado para alinhar o eixo da amostra na direção de carregamento. Então as garras são apertadas e a amostra é carregada a uma taxa de deformação constante ou a um movimento constante da cabeça cruzada. A taxa de deformação padrão é de 0,01 / min e o movimento transversal da cabeça é de 2 mm / min [57].

A carga é aplicada nas amostras até sua falha e um número suficiente de dados válidos é registrado, no caso da ASTM 3039 o número mínimo de amostras são 5, de modo a obter uma representação adequada do comportamento de tensão-deformação do material. A resistência à tração pode ser calculada a partir da carga máxima e da área transversal, transversal média, como segue:

$$X^T = \frac{(P)_{ult}}{A} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$X^T$  = limite de resistência a tração (MPa)

$(P)_{ult}$  = Carga de tração final (N)

$A$  = Média da área da sessão transversal ( $\text{mm}^2$ )

Para o cálculo do módulo é necessária a curva tensão-deformação. De cada ponto dos dados, o estresse é calculado dividindo a carga aplicada pela área média da seção transversal, ou seja,

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$\sigma$  = Tensão de tração axial em um ponto (MPa)

$P$  = Carga aplicada no ponto (N)

$A$  = Média da área da sessão transversal ( $\text{mm}^2$ )

Por outro lado, a deformação em cada ponto é calculada a partir do deslocamento do extensômetro da seguinte maneira:

$$\varepsilon_a = \frac{\delta_a}{L_g} ; \varepsilon_l = \frac{\delta_l}{L_g} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo:

$\varepsilon_a$  = Tensão de tração axial em qualquer ponto de dados

$\varepsilon_l$  = Tensão de tração lateral no ponto

$\delta_a$  = Deslocamento axial do extensômetro no ponto

$\delta_l$  = Deslocamento lateral do extensômetro no ponto

$L_g$  = Comprimento do extensômetro

Compósitos unidirecionais exibem comportamento altamente linear, porém, é possível notar que no início do teste, geralmente observa-se uma certa quantidade de não linearidade. Essa não linearidade é uma anomalia local que pode ser atribuída a fenômenos como derrapagem, assentamento inicial da amostra, folga da máquina, etc. No processo de cálculo do módulo, essa parte não linear inicial da curva não é considerada. O módulo pode ser calculado como módulo tangente ou secante da curva. O módulo da tangente é calculado

como a inclinação da tangente à parte inicial da curva. Também pode ser calculado como a inclinação da tangente à curva em um nível de deformação especificado. O módulo secante é calculado como a inclinação da secante ou corda entre dois pontos na curva, normalmente em valores de deformação de 0,0005 a 0,0025 [57]. Portanto,

$$E^{(T)} = \frac{\Delta\sigma_a}{\Delta\varepsilon_a} \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:

$E^{(T)}$  = Modulo de elasticidade

$\Delta\sigma_a$  = Variação de tensão na tangente

$\Delta\varepsilon_a$  = Variação da deformação axial na tangente

A razão de Poisson é calculada como:

$$\nu^{(T)} = -\frac{\Delta\varepsilon_l}{\Delta\varepsilon_a} \quad \text{Equação 7}$$

onde:

$\nu^{(T)}$  = Coeficiente de Poisson

$\Delta\varepsilon_l$  = Diferença de deformação lateral correspondente à diferença de deformação longitudinal usado no cálculo do módulo

$\Delta\varepsilon_a$  = Variação na deformação axial

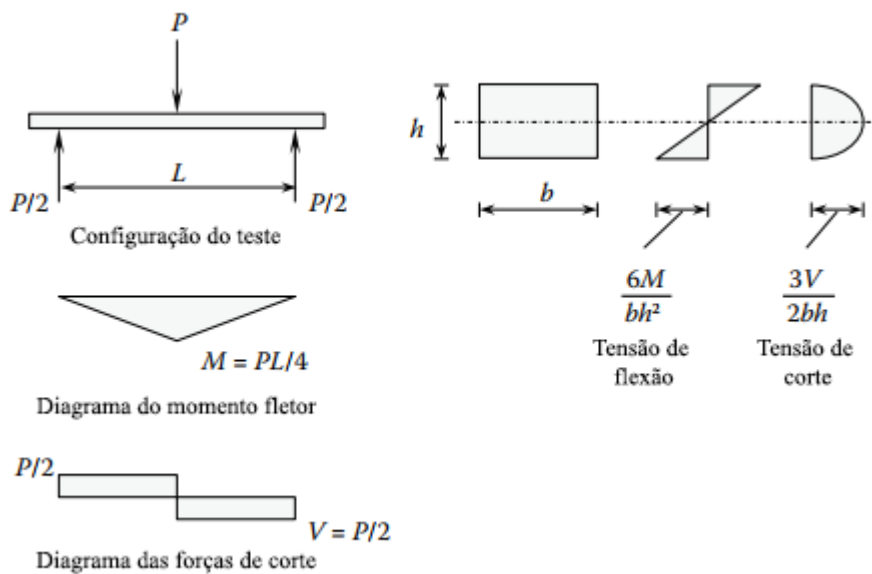
### 2.7.2 Ensaio de flexão

A flexão de uma viga resulta em um estado de tensão que é uma mistura de tensões de tração, compressão e de corte. Como resultado, o módulo e a resistência à flexão não podem ser usados diretamente nos cálculos de projeto. Por isso, diferentemente das propriedades de tração, compressão e corte, o módulo de flexão e sua força não são propriedades fundamentais. Apesar disso, devido à simplicidade inerente ao corpo de prova e ao procedimento de teste, esses testes são frequentemente realizados especialmente para comparação de materiais em processos de controle de qualidade [56].

O objetivo do teste de flexão é determinar o módulo de flexão e a força da flexão. Dois métodos comuns de teste de flexão são: teste de flexão de três pontos e teste de flexão de quatro pontos [56].

O teste de flexão de três pontos utiliza-se de um corpo de prova no formato de viga plana de seção transversal retangular constante. As dimensões exatas dos provetes não são críticas, desde que seja escolhida uma proporção apropriada de espessura do vão para a amostra ( $L / h$ ). A relação  $L / h$  deve ser suficientemente grande para garantir a falha na flexão da amostra. A proporção da espessura do suporte para amostra depende da relação entre a resistência à tração do material e a resistência ao corte interlaminar, e varia de 16: 1 a 60: 1 (Figura 36)[56], [58].

As razões  $L / h$  típicas para compósitos unidirecionais de vidro / epóxi a  $0^\circ$  e compósitos de carbono / epóxi são 16: 1 e 40: 1, respectivamente. A espessura nominal é de 2 mm para compósitos a  $0^\circ$  e 4 mm para compósitos a  $90^\circ$ . Da mesma forma, é comum uma largura nominal de 12,5 mm [56].



**Figura 36.** Configuração do teste de três pontos e diagramas de tensão de flexão e de corte associados, adaptado de [56].

### 2.7.2.1 Ensaio de flexão em 3 pontos

A amostra é montada em um dispositivo de teste devidamente alinhado na máquina de teste e carregada com a ajuda de um nariz de carga, movendo a cabeça a uma taxa constante selecionado de modo a restringir a taxa de deformação máxima na superfície externa abaixo de 0,01 mm / mm. A velocidade comum da cabeça é de 1 a 5 mm / min. A

deflexão da amostra é medida usando um extensômetro. Ocasionalmente, um medidor de deformação é colado na amostra sob o ponto de carga para medir a deformação diretamente [56], [58].

Na flexão de três pontos, a tensão máxima de flexão ocorre na superfície externa da amostra e é dada por:

$$\sigma^{(b)} = \frac{3PL}{2bh^2} \quad \text{Equação 8}$$

Sendo:

$\sigma^{(b)}$  = Tensão de flexão na superfície externa (MPa)

$P$  = Força aplicada (N)

$L$  = Comprimento da amostra (mm)

$b$  = Largura da amostra (mm)

$h$  = Espessura da amostra (mm)

A resistência à flexão é obtida substituindo  $P$  pela força máxima  $P_{ult}$ . Quando a deflexão é medida, a tensão de flexão é calculada como:

$$\varepsilon^{(b)} = \frac{6\delta h}{L^2} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$\varepsilon^{(b)}$  = Tensão de flexão

$\delta$  = Deflexão da faixa média

O módulo de flexão é calculado a partir da porção linear inicial do gráfico de tensão de flexão e tensão de flexão da seguinte forma [56], [58]:

$$E^{(b)} = \frac{L^3}{4bh^3} \left( \frac{\Delta P}{\Delta \delta} \right) \quad \text{Equação 10}$$

em que:

$\Delta P$  = Diferença nas forças aplicadas em dois pontos na porção linear inicial do gráfico de deformação por deformação por flexão (N)

$\Delta\delta$  = Diferença nas deflexões nos pontos correspondentes na tensão gráfico de deformação (mm)

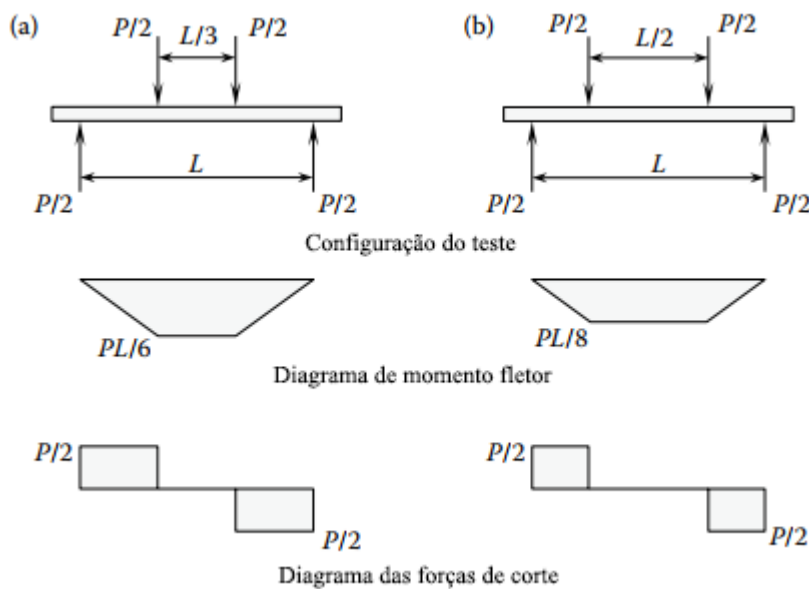
L = Comprimento da amostra (mm)

b = Largura da amostra (mm)

h = Espessura da amostra (mm)

### 2.7.2.2 Flexão de 4 pontos

A amostra no teste de flexão de quatro pontos é semelhante à amostra de flexão de três pontos. A proporção de espessura de suporte para amostra recomendada é de 16: 1. A amostra é carregada por dois cilindros de ponta de carregamento. O intervalo de carga pode ser um terço do intervalo de suporte ou metade, como pode ser visto na Figura 37 [56], [58].



**Figura 37.** Flexão em quatro pontos. (a) A distância entre as cargas é um terço do comprimento do suporte. (b) A distância entre as cargas é metade do comprimento do suporte, adaptado de [56], [58].

Nesse tipo de teste o momento de flexão é máximo e constante entre as cargas aplicadas. A tensão máxima de flexão, que ocorre na superfície externa da amostra, depende da região onde é aplicada a carga. Quando o intervalo de aplicação da carga é um terço do intervalo de comprimento entre os suportes, a tensão máxima de flexão é dada por:

$$\sigma^{(b)} = \frac{PL}{bh^2} \quad \text{Equação 11}$$

E sua deformação máxima é:

$$\varepsilon^{(b)} = 4.7 \frac{\delta h}{L^2} \quad \text{Equação 12}$$

E no caso quando o intervalo de aplicação da carga é metade do intervalo de comprimento entre os suportes, a tensão máxima de flexão é dada por [56], [58]:

$$\sigma^{(b)} = \frac{3PL}{4bh^2} \quad \text{Equação 13}$$

E sua deformação máxima é:

$$\varepsilon^{(b)} = 4.36 \frac{\delta h}{L^2} \quad \text{Equação 14}$$

Para o cálculo do modulo de flexão a seguinte formula é utilizada para quando a distância de aplicação é um terço:

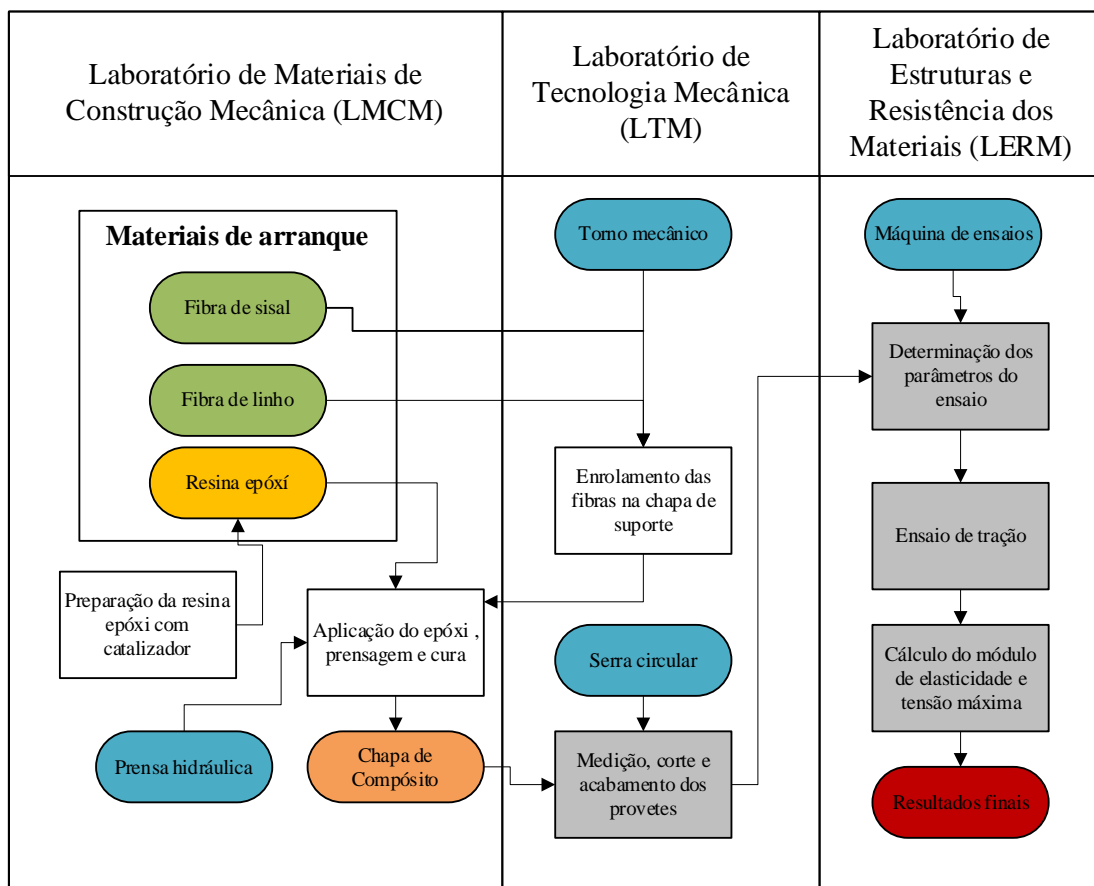
$$E^{(b)} = \frac{0.21L^3}{bh^3} \left( \frac{\Delta P}{\Delta \delta} \right) \quad \text{Equação 15}$$

E para quando é metade:

$$E^{(b)} = \frac{0.17L^3}{bh^3} \left( \frac{\Delta P}{\Delta \delta} \right) \quad \text{Equação 16}$$

## Capítulo 3: Metodologia

A Figura 38 apresenta um fluxograma que resume os procedimentos, materiais e laboratórios utilizados para a execução deste trabalho. As caixas brancas indicam os procedimentos para a confecção dos compósitos e as cinzas indicam os processos para obtenção de suas propriedades, já as formas azuis representam as ferramentas e máquinas utilizadas, e o restante engloba os produtos derivados dos processos e os materiais de arranque.



**Figura 38.** Fluxograma de processos e materiais utilizados para a execução do trabalho.

Segundo o fluxograma da Figura 38, os procedimentos iniciais para a execução do experimento começaram pela aquisição e armazenamento dos materiais utilizados no Laboratório de Materiais de Construção Mecânica (LMCM). Esses materiais estão



representados na caixa materiais de arranque no fluxograma, e são compostos pelas fibras e a pela resina epóxi (ver seção 3.1.2 e seção 3.1.3).

Para a confecção dos compósitos fibrosos, as fibras foram submetidas ao processo de enrolamento na chapa de suporte no torno mecânico situado no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM) (ver seção 3.2.1) . Em seguida, no LMCM, a resina epóxi foi adquadamente misturada com o catalisador (ver seção 3.2.2). Preparada a resina, aplicou-se a mesma às fibras enroladas na chapa suporte e o conjunto foi inserido em uma prensa hidráulica até que todo o processo de cura estivesse finalizado por completo (ver seção 3.2.3). O procedimento resultou na placa de compósito da fibra utilizada.

Para determinar as propriedades mecânicas desse novo material, foi necessário a fabricação de corpos de prova (provetes) para relizar os respectivos testes mecânicos. Para isso, o compósito foi retirado da chapa que servia de suporte, medido e submetido ao processo de corte e acabamento com o auxílio de uma serra circular no LTM (ver seção 3.2.4). Com os provetes em mãos, os mesmos foram levados ao Laboratório de Estrutura e Resistência dos Materiais (LERM) para utilização da máquina de ensaios universal. No local, determinou-se os parâmetros para a realização do ensaio e então realizou-se propriamente o ensaios no equipamento (ver seção 3.2.5). Com os dados gerados, os gráficos de tensão-deformação foram plotados e os cálculos de resistência mecânica foram efetuados, chegando, assim, aos resultados finais das propriedades mecânicas dos materiais investigados (ver seção 3.3).

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 Fibras

Tal como referido anteriormente, os compósitos desenvolvidos neste trabalho irão utilizar fibras naturais de sisal e de linho. Ambas foram adquiridas em Bragança (Portugal) sob a forma de novelos. O fio de sisal possui, em média, 2 milímetros de diâmetro e 50 metros de comprimento, sendo composto pelo enrolamento de 2 cabos, totalizando 100 gramas de massa (Figura 39.a).

O fio norte (linho) utilizado foi um novelo número 12, 50 metros sem enrolamento, com, aproximadamente, 50 gramas e diâmetro médio de 1 milímetro (Figura 39.b).

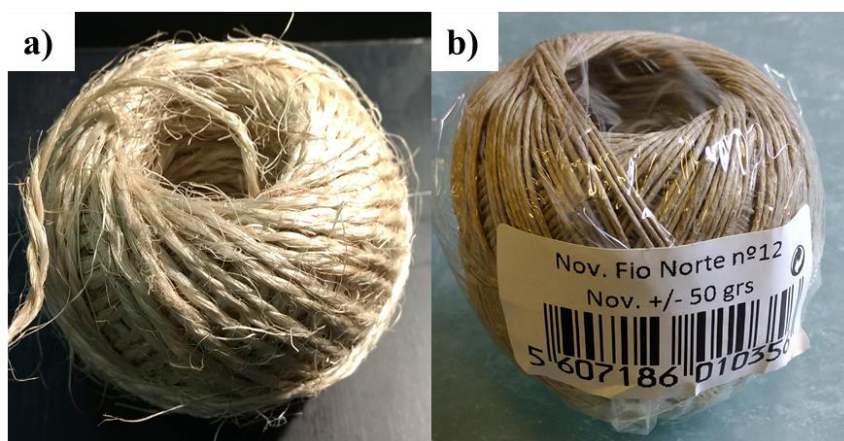


Figura 39. Novelos de (a) fio de sisal e (b) fio do norte.

#### 3.1.2 Resina epóxi e catalizador

A resina epóxi utilizada foi a de bisfenol A epiclоридrina fornecida por Sicomin sob o código de SR5550. O catalizador da mesma foi o polioxipropileno triamina fornecida também por Sicomin sob o código de SD5503.



Figura 40. (a) Resina epóxi e (b) catalizador utilizado.

## 3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os procedimentos descritos a seguir foram reproduzidos tanto para a confecção do compósito de sisal quanto para o de linho.

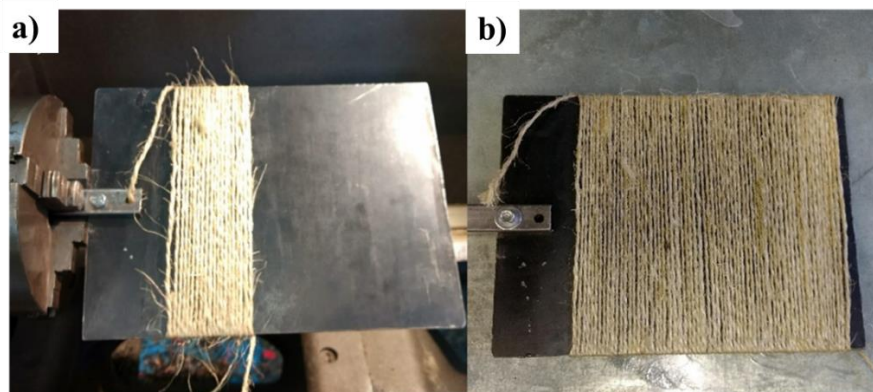
### 3.2.1 Alinhamento das fibras

Nesta etapa foi seguido o protocolo realizado por Ribeiro, Rocha e Queijo [59]. O alinhamento das fibras foi realizado com o auxílio de um torno mecânico localizado no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM) do Instituto Politécnico de Bragança (IPB). Para isso, utilizou-se uma chapa de aço acoplada a um cabo de aço retangular. Em seguida, aplicou-se cera desmoldante à placa e fixou-se na bucha do torno mecânico. Foi selecionada a velocidade mínima do torno mecânico (14 RPM), assim, foi possível enrolar as fibras na chapa de aço de modo a manter seu correto alinhamento, conforme a Figura 41 .



**Figura 41.** Alinhamento de fio do norte utilizando torno mecânico.

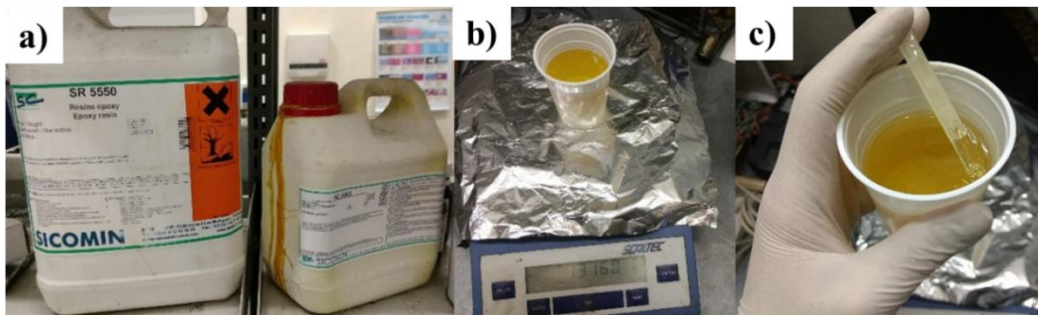
O enrolamento foi realizado com o fio de sisal conforme pode ser visto na Figura 42. A quantidade total de fibra utilizada foi de 30 m para o sisal e 50 m para o linho.



**Figura 42.** (a) Alinhamento das fibras durante o processo (b) Procedimento de alinhamento já finalizado.

### 3.2.2 Preparação da resina

Foram preparadas 130 g de resina em um copo plástico, utilizando-se uma proporção 3:1 entre resina epóxi e catalisador (Figura 43.a). Após a pesagem em uma balança de precisão (Acaltec) (Figura 43.b), a mistura foi homogeneizada com um palito de plástico (Figura 43.c).

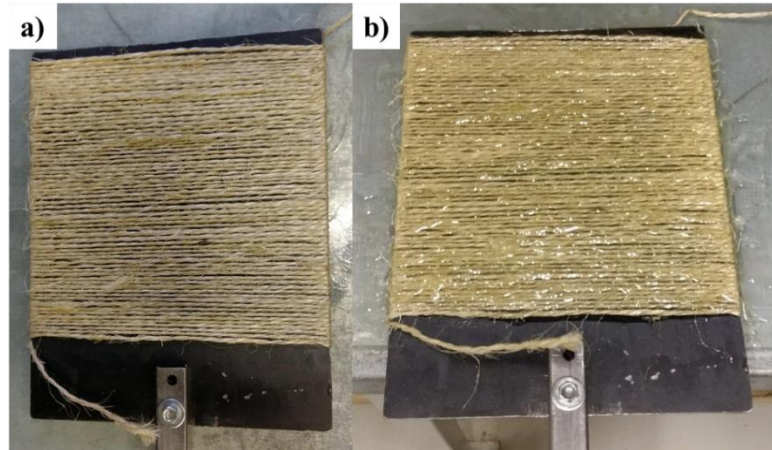


**Figura 43.** (a) resina e catalisador; (b) pesagem em balança de precisão; (c) mistura da resina e o catalisador.

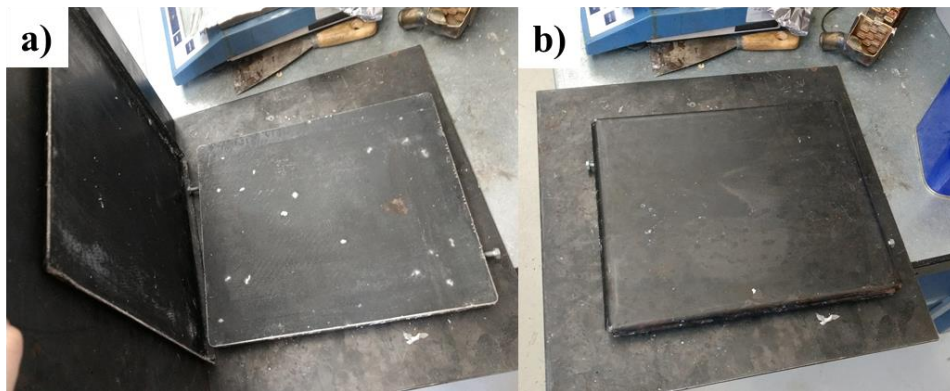
### 3.2.3 Aplicação da resina nas fibras

Seguido do preparo, foi realizada a aplicação da resina por meio de um pincel, sendo espalhado o produto de maneira a molhar todas as fibras da placa, de ambos os lados (Figura 44). Na sequência, aplicou-se uma fina camada de cera desmoldante às placas que serviram de suporte para a prensagem (Figura 45).

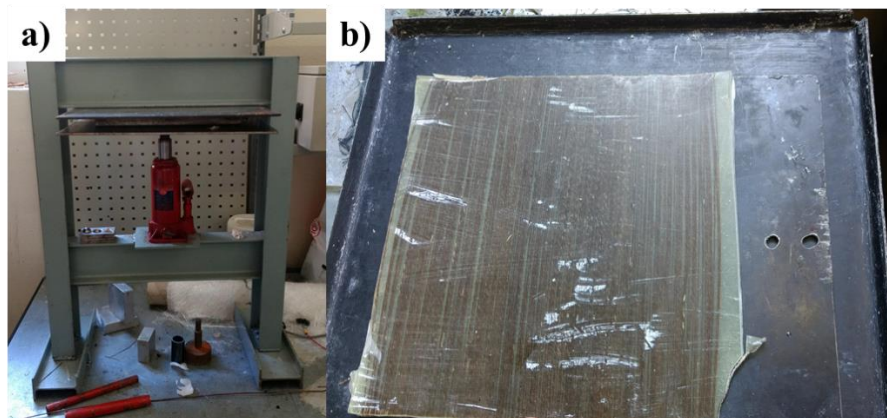
Por fim, o compósito foi colocado na prensa, junto às chapas de aço para conter eventuais vazamentos de resina. Aplicou-se uma pressão de, aproximadamente, 1 kPa por um período de 24 horas, à temperatura ambiente ( $t_{med} \cong 20^{\circ} C$ ) para garantir a cura total da resina epóxi (Figura 46) [60].



**Figura 44.** (a) Antes da aplicação da resina (b) depois da aplicação da resina.



**Figura 45.** Conjunto de chapas que serviram de suporte; (a) pós aplicação do desmoldante (b) suporte fechado e pronto para a prensagem.

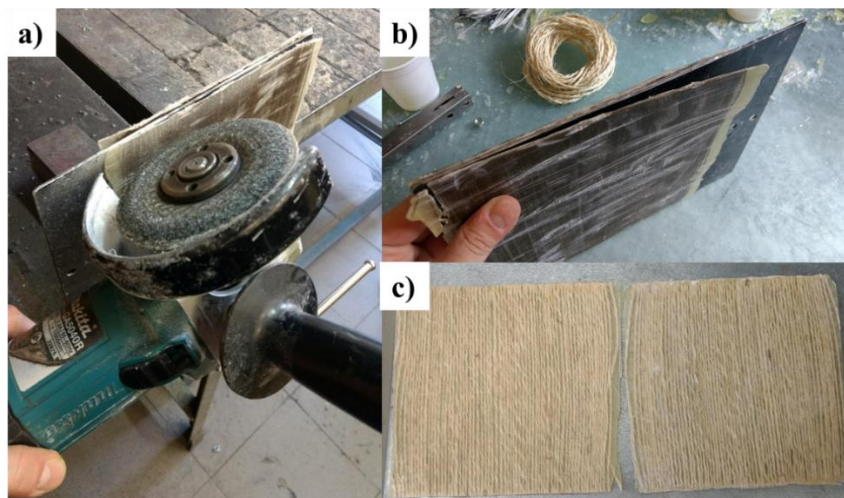


**Figura 46.** (a) Prensagem do compósito utilizando a prensa; (b) material totalmente curado após 24 h.

#### 3.2.4 Corte e preparo de corpos de prova (provetes)

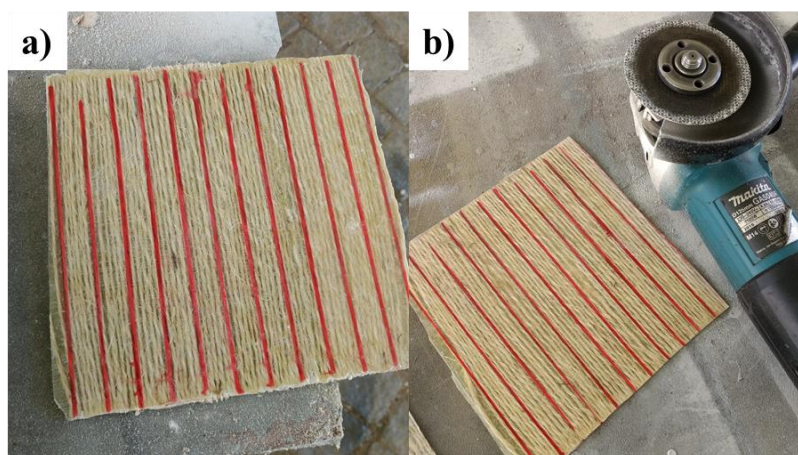
Após a cura completa do material, as rebarbas foram cortadas com um disco circular (rebarbadeira). As duas partes do compósito foram separadas por meio de cortes nas arestas

da placa de aço, conforme a Figura 47. Ambas as placas fabricadas tinham dimensões de 200 mm x 200 mm.



**Figura 47.** (a) Rebarbadeira durante o corte; (b) corte completo; (c) partes já separadas da placa pelo processo de corte.

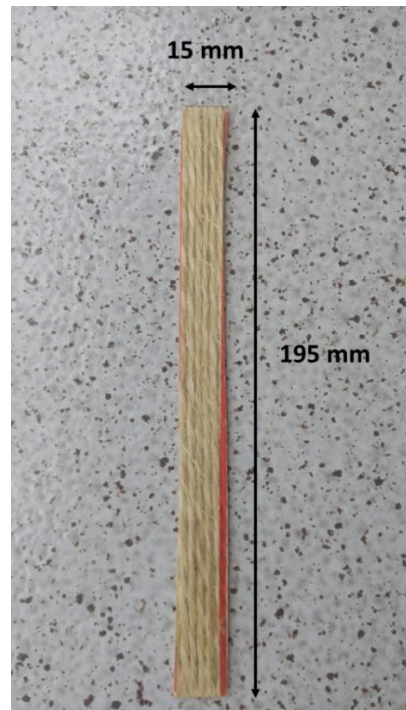
Depois disso, foram medidas e marcadas linhas distanciadas a cada 15 mm (largura do provete) para auxiliar a realização do corte. Realizou-se o procedimento com um disco de corte fino para aço em ambiente aberto a fim de evitar contaminação do laboratório pelo pó gerado pelo material (Figura 48).



**Figura 48.** (a) Marcação de linhas de guia para corte; (b) Realização do corte.

Pela norma ASTM 3039 [57], o comprimento recomendado dos corpos é de 250 mm e largura de 15 mm, no entanto devido as restrições das dimensões da chapa confeccionada, o comprimento dos provetes situou-se em 195 mm e largura de 15 mm (

Figura 49). A espessura variou de acordo com o tipo da fibra, com 1 mm de espessura para os compósitos de linho e 2 mm para os de sisal.



**Figura 49.** Medidas dos provetes.

Pós cortados (Figura 50), as pontas dos provetes foram aparadas para melhor assentamento nas garras da máquina de ensaio e suas arestas foram desbastadas com uma serra de desbaste de modo a ajustar as medidas de sua largura de acordo com a norma [57].



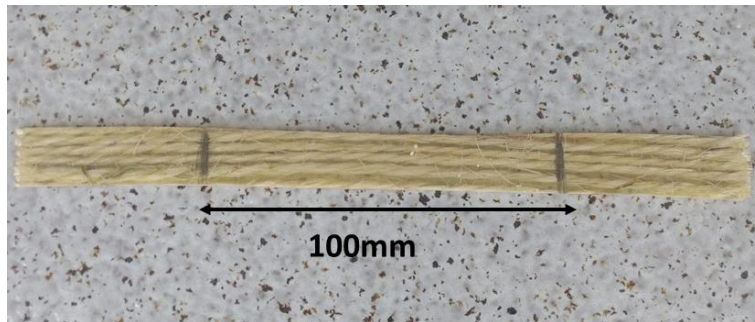
**Figura 50.** Provetes do compósito epóxi/linho já cortados.

### 3.2.5 Ensaio de tração

Os parâmetros e procedimentos para os ensaios de tração estão explicitados nas subseções a seguir.

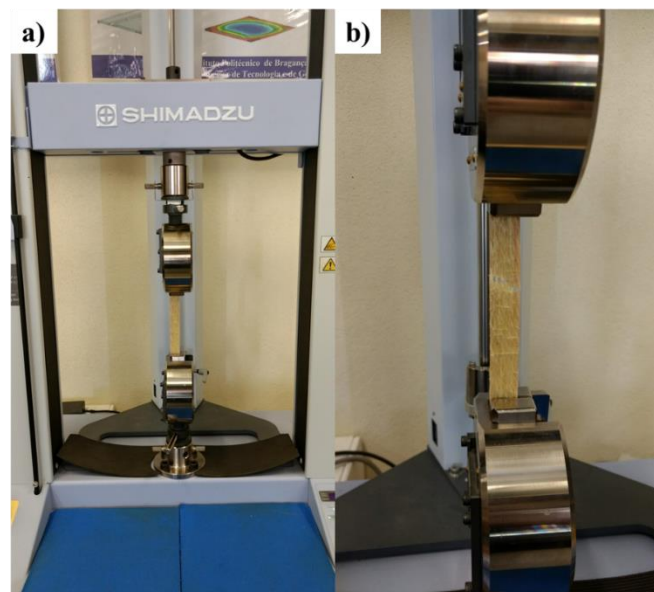
### 3.2.5.1 Ensaio Epóxi/Sisal

Para iniciar o ensaio, estipulou-se um comprimento entre garras de 100 mm em cada peça a ser testada, como pode ser visto na Figura 51. Esse valor foi, arbitrariamente, estipulado pois a norma ASTM 3039 [57] não aponta nenhum valor padrão para a o distanciamento entre garras.



**Figura 51.** Medida do comprimento entre garras no compósito de sisal.

Com os provetes medidos corretamente, a máquina de ensaios (Shimadzu, AGS-X) foi configurada para uma distância entre garras de 100 mm, espessura da peça 2 mm e velocidade de ensaio 2 mm/min. Em seguida, os provetes foram acoplados às garras e iniciou-se o ensaio (Figura 52).

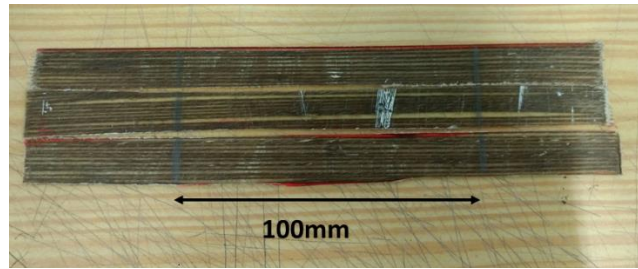


**Figura 52.** (a) Máquina de ensaios (Shimadzu) utilizada nos ensaios; (b) primeiro ensaio em compósito de sisal no equipamento.

### 3.2.5.1 Ensaio Epóxi/Linho

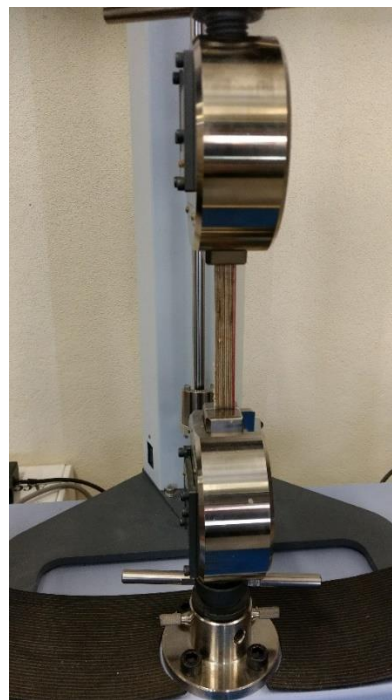
Neste caso, estipulou-se um comprimento entre garras também de 100 mm e foram marcadas linhas para a correta inserção de cada corpe de prova no equipamento.





**Figura 53.** Medida do comprimento entre garras no compósito de linho.

Com os provetes marcados, a máquina de ensaios foi configurada para uma distância entre garras de 100 mm, espessura da peça 1 mm e velocidade de ensaio 2 mm/min. Então, os provetes foram acoplados às garras e iniciou-se o ensaio (Figura 54).



**Figura 54.** Realização de ensaio de tração em compósito de fibra de linho do norte (fio do norte).

### 3.3 OBTENÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRACÇÃO E MÓDULO DE YOUNG

Devido ao grande número de dados gerados pelos ensaios, todos os gráficos e cálculos presentes nesse trabalho foram realizados utilizando linguagem de programação Python 3.8 com ênfase no uso das bibliotecas Pandas e matplotlib.

Para o cálculo da resistência à tração de cada provete utilizou-se a Equação 4, levando em conta as dimensões da área transversal de cada corpo de prova.

Para o sisal a área transversal foi de:

$$A_s = 2 \text{ mm} * 15 \text{ mm} = 30 \text{ mm}^2 = 30 * 10^{-6} \text{ m}^2$$

Para o linho a área transversal foi de:

$$A_l = 1 \text{ mm} * 15 \text{ mm} = 15 \text{ mm}^2 = 15 * 10^{-6} \text{ m}^2$$

Aplicando Equação 4, temos:

$$\sigma_s = \frac{P_s}{30 * 10^{-6}} ; \sigma_l = \frac{P_l}{15 * 10^{-6}}$$

Onde

$\sigma_s$ =Tensão aplicada no compósito com sisal

$\sigma_l$ =Tensão aplicada no compósito com linho

$P_s$ = Força aplicada no compósito com sisal

$P_l$ = Força aplicada no compósito com linho

Com isso, foi possível plotar os gráficos Tensão-deformação que se encontram nos Anexos A e B.

Para o cálculo do Módulo de Young de cada provete utilizou-se uma aproximação por método gráfico traçando uma reta que intersecciona os pontos zero e 0.002 % de cada gráfico, procedimento baseado na norma ASTM 3039 [57]. Desse modo, foi possível encontrar um valor para a reta tangente na região elástica do material e, conseqüentemente, seu módulo de Young.

## Capítulo 4: Resultados e Discussões

### 4.1 CORPOS DE PROVA

Após a execução dos ensaios foi possível avaliar algumas características em relação aos corpos de provas testados e seu padrão de rompimento.

Para o compósito de sisal foram realizados um total de 8 ensaios, sendo uma das amostras descartada por romper em uma região inválida. Por fim, o teste rendeu 7 resultados válidos. Na Figura 55 pode-se ver os 7 resultados válidos e o inválido em destaque pelo círculo vermelho. O rompimento das fibras seguiu um padrão idêntico para vários ensaios como pode ser visto na Figura 56.



**Figura 55.** Os 8 ensaios realizados com destaque para o resultado inválido por romper próximo a garra do equipamento.



**Figura 56.** Padrão de rompimento observado nas fibras de sisal.

No caso dos compósitos de linho, o número de ensaios total foi 11, porém 4 desses foram descartados por romper em regiões inválidas. Na Figura 57 pode-se ver os 7 resultados válidos e os 4 inválidos (ruptura fora da zona válida) destacados pelos círculos vermelhos na imagem. O padrão do comportamento do compósito de linho pode ser visto na Figura 58.



**Figura 57.** Os 11 ensaios realizados com destaque para os resultados inválidos por romper próximo a garra do equipamento.



**Figura 58.** Padrão de rompimento do compósito de epóxi/linho (fio do norte).

Os dados obtidos dos testes podem ser vistos na Tabela 12. Os gráficos plotados de tensão-deformação para o linho e para o sisal, encontram-se nos Anexos A e B, respectivamente.

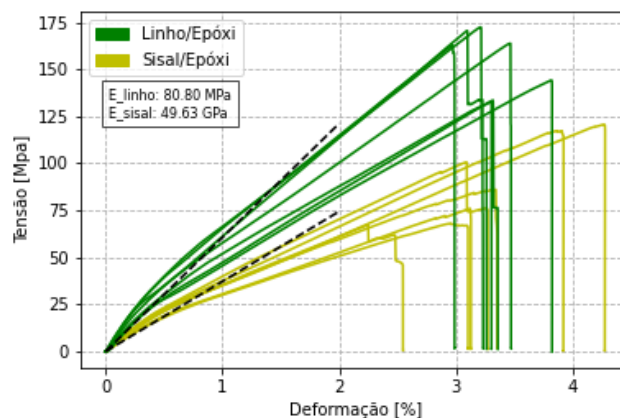
## 4.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS COMPÓSITOS

Na Tabela 12 estão os dados obtidos nos ensaios de tração, com os dados inválidos representados por “-”.

**Tabela 12.** Dados obtidos nos ensaios de tração.

<i>Ensaio</i>	<i>Sisal/Epóxi</i>		<i>Linho/Epóxi</i>	
	Tensão máxima [N/mm <sup>2</sup> ]	Deformação máxima [%]	Tensão máxima [N/mm <sup>2</sup> ]	Deformação máxima [%]
1	117.30	3.86	172.43	3.21
2	120.64	4.27	-	-
3	-	-	133.53	3.31
4	100.61	3.09	-	-
5	67.25	2.25	132.65	3.30
6	68.06	2.95	-	-
7	75.97	3.12	162.76	2.97
8	86.10	3.34	-	-
9	-	-	170.48	3.09
10	-	-	163.75	3.46
11	-	-	144.17	3.82
<b>Média</b>	<b>90.85</b>	<b>3.27</b>	<b>154.25</b>	<b>3.31</b>
<b><math>\sigma</math></b>	<b>22.37</b>	<b>0.65</b>	<b>17.10</b>	<b>0.27</b>

É possível notar um elevado valor do desvio padrão ( $\sigma$ ) dos dados obtidos devido à variação dimensional dos corpos de prova, pois o corte manual favorece erros humanos no processo, afetando as dimensões finais dos provetes. Um panorama geral dos gráficos gerados pode ser visto na Figura 59.

**Figura 59.** Gráfico dos ensaios realizados nos provetes válidos.

Como esperado, o compósito com linho apresentou um valor maior para a tensão máxima de rutura, com uma média de 154 MPa contra 90 MPa do sisal, o que representa, aproximadamente, 70% a mais de resistência à tração. O mesmo ocorreu para o módulo de elasticidade, sendo, em média, 63% maior no compósito linho/epóxi. Isso pode estar

relacionado com a origem de cada fibra. Segundo Baley et al. [6], fibras do caule, como o linho, em geral, possuem maior resistência que fibra de folhas, como é o caso do sisal. Essa resistência provavelmente está mais relacionada ao menor ângulo de microfibrila (AMF) da fibra de linho em relação ao sisal, visto que as características químicas de ambas as fibras são muito semelhantes e não sofreram nenhum tratamento químico. A Tabela 13 mostra um resumo comparativo entre as propriedades dos dois compósitos produzidos neste trabalho.

**Tabela 13.** Tabela comparativa de propriedades entre os compósitos testados.

<i>Propriedade</i>	<i>Linho/Epóxi</i>	<i>Sisal/Epóxi</i>	<i>Referência</i>
<i>Resistência a tração [MPa]</i>	133 – 172	67 – 121	Obtido pelo ensaio
<i>Resistência a tração (média) [MPa]</i>	154.3	90.8	Obtido pelo ensaio
<i>Módulo de Young (média) [GPa]</i>	80.8	49.6	Obtido pelo ensaio
<i>Resistência da fibra [MPa]</i>	800 – 1500	390 – 450	[5], [22]
<i>Resistência do epóxi [MPa]</i>	50 – 125		[3]
<i>Módulo de Young da fibra</i>	60 – 80	12 – 41	[5], [22]
<i>Módulo de Young do epóxi [GPa]</i>	2.5 – 4		[3]
<i>Ângulo de microfibrilas (AMF) [°]</i>	5 – 10	10 – 22	[22], [27]
<i>Origem</i>	Caule	Folhas	[22]
<i>Celulose [%]</i>	70	66	[5], [34]
<i>Hemicelulose [%]</i>	17	12	[5], [34]
<i>Lignina [%]</i>	2.5	9.9	[5], [34]
<i>Preço fibra [USD.kg<sup>-1</sup>]</i>	3.11	0.65	[22]

Um ponto a notar-se é que os valores de resistência à tração de ambos os compósitos estão dentro da faixa intermediária entre o epóxi e a respectiva fibra, apesar dos valores serem mais próximos do primeiro do que do segundo. Isso pode indicar que existe baixa

afinidade química entre as fibras e o polímero, o que já era esperado visto que os pré-tratamentos aplicados às fibras têm justamente o papel de aumentar a força de ligação da interface entre matriz e fibra.

Outro ponto a tratar-se é o fato do valor do módulo de Young de ambos os tipos de compósitos serem extremamente próximos aos encontrados na literatura para a suas fibras, podendo indicar que na região elástica, o compósito se comporta com baixa influência das propriedades mecânicas de sua matriz.

Em termos econômicos, o sisal apresenta um preço por quilo de quase 5 vezes menor do que o linho, facto que pode compensar sua natureza menos resistente em aplicações específicas.

### 4.3 ESTIMATIVA DO MODULO DE YOUNG PELA REGRA DA MISTURA

Sabendo que foi utilizado aproximadamente 30 metros de sisal com um diâmetro médio de 2 mm, seu volume total pode ser calculado da seguinte maneira: ( $L_s$  = comprimento utilizado de sisal,  $D_s$  = diâmetro sisal)

$$\begin{aligned} V_{sisal} &= \frac{\pi}{4} (D_s)^2 * L_s && \text{Equação 17} \\ &= \frac{\pi}{4} (0.002 \text{ m})^2 * 30 \text{ m} \\ &= 9.42 * 10^{-5} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Em relação ao epóxi, utilizou-se 130 g de resina no experimento, porém, deve-se levar em conta o derramamento do excesso para fora do molde devido à pressão aplicada. Estipulando essa perda em 25 %, sua massa fica em torno de 100 g. Dessa maneira, calcula-se o volume da resina, com base no valor de densidade da mesma encontrado na literatura ( $d_{epóxi} = 1.2 \text{ g cm}^{-3}$ ;  $m_e$  = massa de epóxi utilizada) [3].

$$\begin{aligned} V_{epóxi} &= \frac{1}{d_{epóxi}} * m_e && \text{Equação 18} \\ &= \frac{1}{1200 \text{ kg}} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} * 0.1 \text{ kg} \\ &= 8.33 * 10^{-5} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Com isso, encontra-se a fração volumétrica da matriz e da fibra:

$$\begin{aligned}
 V_m &= \frac{V_{epóxi}}{V_{epóxi} + V_{fibra}} && \text{Equação 19} \\
 &= \frac{8.33 * 10^{-5} m^3}{8.33 * 10^{-5} m^3 + 9.42 * 10^{-5} m^3} \\
 &= 46.9\%
 \end{aligned}$$

Então,

$$V_f = 53.1\%$$

Pela Equação 2, estima-se o módulo de elasticidade teórico do compósito, com base no valor médio do módulo de Young da fibra e da matriz encontrados na Tabela 13 ( $E_f = 26.5 \text{ GPa}$ ;  $E_m = 3.25 \text{ GPa}$ ):

$$\begin{aligned}
 E_{t, \text{sisal}} &= E_f V_f + E_m V_m \\
 &= 26.5 \text{ GPa} * 0.531 + 3.25 \text{ GPa} * 0.469 \\
 &= 15.6 \text{ GPa}
 \end{aligned}$$

O mesmo procedimento é feito para o linho utilizando a Equação 17, Equação 19, Equação 2 e levando em conta os dados  $L_l = 50 \text{ m}$ ;  $D_l = 1 \text{ mm}$ ;  $E_m = 3.25 \text{ GPa}$ ;  $E_f = 70 \text{ GPa}$ :

$$\begin{aligned}
 V_{linho} &= 3,92 * 10^{-5} m^3 \\
 V_m &= 67.9\% ; V_f = 32.1\% \\
 E_{t, \text{linho}} &= 24.7 \text{ GPa}
 \end{aligned}$$

A Tabela 14 mostra uma comparação dos módulos de Young obtidos através da regra da mistura e seus respectivos módulos encontrados pelos ensaios.

**Tabela 14.** Comparação entre módulo de elasticidade teórico e experimental.

	<b>Linho/Epóxi</b>	<b>Sisal/epóxi</b>
Teórico - Regra da mistura (GPa)	24.7	15.6
Ensaio - Resultado gráfico (GPa)	80.8	49.6
Erro (%)	69.4	68.5



De acordo com os cálculos houve um erro relativamente grande entre os resultados teóricos e os práticos (aproximadamente 69% em ambos os materiais). Isso pode estar associado a diferenças nos dados das propriedades mecânicas das fases do material nos ensaios e os encontrados na bibliografia. Também deve ser levado em conta os erros de medição de volume e a própria imprecisão intrínseca ao modelo.

A respeito da imprecisão da regra, uma equação mais precisa pode ser modelada assumindo a hipótese de que o erro encontrado (~69%) é um erro sistemático que pode ser corrigido através de um fator de correção  $\gamma$ . Dessa maneira, a Equação 2, pode ser reescrita como:

$$E_c = \gamma (E_f V_f + E_m V_m) \quad \text{Equação 20}$$

Tendo como o fator de correção para o linho/epóxi:

$$\gamma_l = 3.27$$

E para o sisal/epóxi:

$$\gamma_s = 3.18$$

## 4.4 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

Será realizada, nas subseções seguintes, uma comparação entre os valores obtidos pelos ensaios e os encontrados na literatura, para os compósitos poliméricos de sisal e linho.

### 4.4.1 Sisal/epóxi

O compósito com fibras de sisal apresentou valores de resistência à tração significativamente mais altos comparados com a literatura, tendo como base os trabalhos de Vishnuvardhan, Kothari, e Sivakumar [61] e Anidha, Latha, e Muthukkumar [62], os quais realizaram estudos das propriedades mecânicas e físicas dos compósitos de sisal e epóxi em diferentes proporções entre matriz e reforço. A comparação pode ser vista na Tabela 15.

**Tabela 15.** Tabela comparativa de valores de resistência a tração com diferentes porcentagens de fibra de sisal de acordo com a literatura.

Compósito	Resistência a tração (MPa)	Referência
53.1% sisal (Experimento)	90.8	-
15% sisal	30.36	[61]
20% sisal	35.20	[61]
25% sisal	41.65	[61]
40% sisal	37.5	[62]
50% sisal	31.4	[62]
60% sisal	27.2	[62]

De acordo com a Tabela 15, percebe-se que a resistência do material ensaiado é superior a 2 vezes os valores obtidos para compósitos desse tipo, mesmo no caso da fração volumétrica de 60% que é maior do que a estimada para os provetes de sisal. Esse comportamento pode estar associado à variação da metodologia de confecção do compósito, pois os estudos apontados como referência utilizavam-se de fibras tiradas diretamente da planta, produzidos em moldes e com cordas não enroladas.

Apesar disso, é possível ver que existe uma relação proporcional entre a percentagem de fibra e a resistência final do compósito, como foi apontado por Vishnuvardhan, Kothari, and Sivakumar [61] na Figura 60. Essa relação é observada na Figura 61, na qual o provete 5, que possui menor quantidade de fibra em relação ao 4, apresenta menor resistência mecânica.

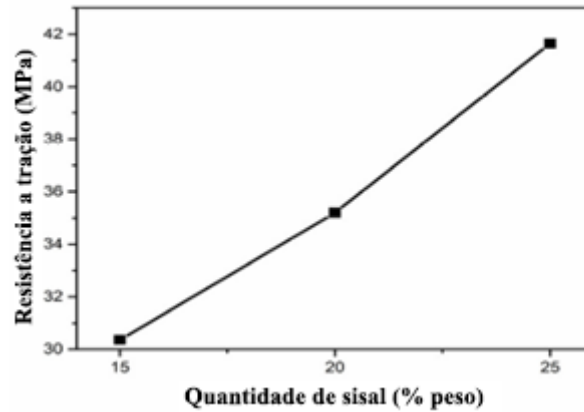


Figura 60. Relação entre percentagem de fibra e resistência a tração encontrada por [61].

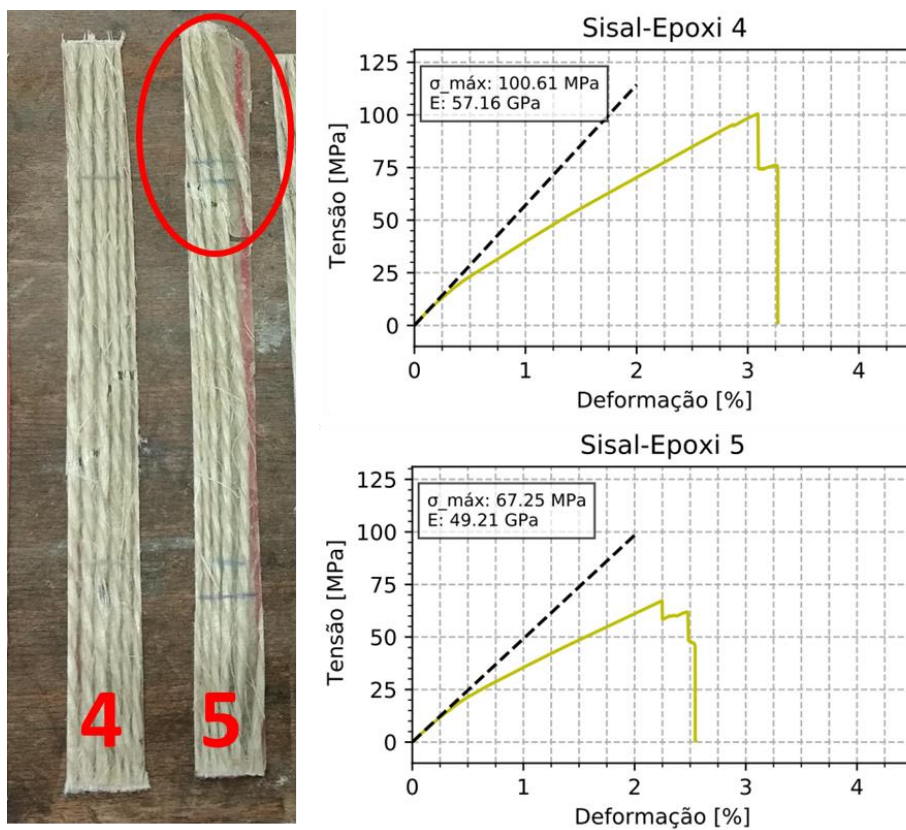


Figura 61. Relação entre quantidade de fibras e resistência a tração encontrada através dos dados obtidos pelos ensaios. O círculo vermelho representa a região aparente com pouca concentração de fibras de sisal.

#### 4.4.2 Linho/epóxi

De acordo com a Tabela 16, o compósito de linho teve um resultado mais próximo com o da literatura, segundo Van de Weyenberg et al. [48], cujo trabalho foi comparar compósitos de linho não tratado e linho submetido a diversos tratamentos. No entanto, a mesma concordância de resultados não é verificada quando comparada ao estudo de Baets

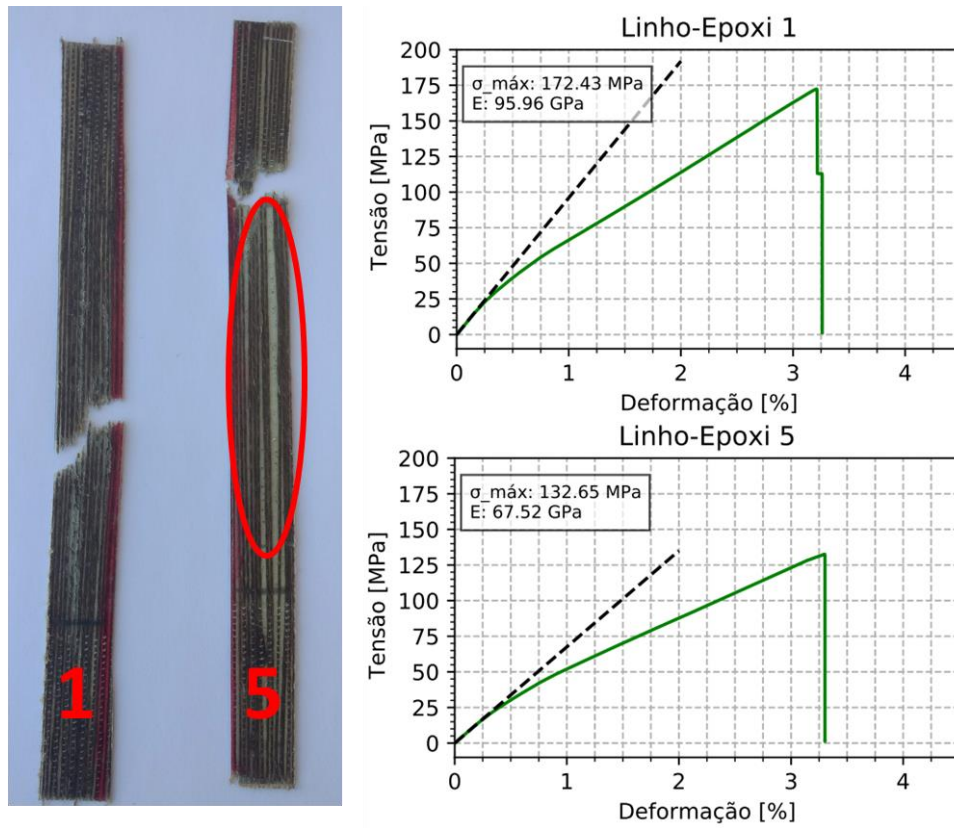
et al. [63], que realizou uma análise das propriedades mecânicas de compósitos de linho e epóxi confeccionados com diferentes arranjos da fibra, tais como a fibra penteada, em forma de novelo, e em formato de fio.

**Tabela 16.** Tabela comparativa de valores de resistência à tração com diferentes porcentagens de fibra de linho de acordo com a literatura.

<b>Compósito</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Referência</b>
32.1% linho (Experimento)	154.3	
40% linho	133	[48]
45% linho	93	[64]
42% linho (penteado)	378	[63]
48% linho (novelo)	377	[63]
50% linho (fio)	315	[63]

Apesar das discrepâncias com os dados encontrados por Baets et al. [63], outro estudo realizado por Sodoke et al. [64], comparou várias técnicas para caracterização do módulo de Young em compósitos de sisal-epóxi. Esse, porém, encontrou resultados de teste de tração mais próximos aos obtidos pelos ensaios deste trabalho. Mesmo assim, em geral, os resultados obtidos pelos autores, mostraram-se muito variados e pouco similares aos obtidos nos ensaios.

A respeito da proporção entre fibra e resistência, foi possível notar uma correlação através dos ensaios, assim como no caso do sisal. O compósito de linho manifestou menor resistência em provetes com menor concentração de fibras. A Figura 62 mostra a comparação entre o provete 1 e o provete 5, esse último com aparente região de menor concentração de fibras.



**Figura 62.** Relação entre quantidade de fibras e resistência a tração encontrada através dos dados obtidos pelos ensaios. O círculo vermelho representa a região aparente com menor concentração de fibras de linho.

## Capítulo 5: Conclusão

---

A partir da análise dos resultados obtidos por este trabalho, foi possível concluir os seguintes pontos:

- O compósito de linho/epóxi apresentou-se superior no requisito de resistência à tração, com um valor 70% maior que o sisal/epóxi. Facto justificado devido às diferentes origem e estrutura das fibras;
- Os valores de resistência à tração de ambos os compósitos encontram-se dentro da faixa intermediária entre o epóxi e a respectiva fibra, indicando concordância dos resultados com a teoria do comportamento destes materiais abordada pela bibliografia.
- O modelo de equação da regra da mistura para cálculo do módulo de elasticidade dos compósitos não ofereceu uma boa aproximação para este estudo, sendo necessário o uso de fatores para corrigir a precisão da estimativa teórica. Esse resultado se deve às diferenças dos valores obtidos no ensaio e na literatura, erros de medição de volume e a própria imprecisão do modelo base.
- A resistência do sisal/epóxi foi quase duas vezes superior aos dados encontrados na literatura. No caso do linho/epóxi, esses valores apresentaram-se bastante variados e pouco similares aos obtidos no experimento. Situações explicadas pelas diferenças nos métodos de fabrico de compósitos dos autores usados como referência.
- Ambos os tipos de compósitos tiveram sua resistência final influenciada pelo volume de fibra contido em cada provete, corroborando com estudo teóricos que mostram uma proporcionalidade direta entre o volume de fibra e resistência esperada.

Como sugestão à trabalhos futuros:

- Caracterização físico-química das fibras envolvidas nos ensaios para melhor precisão na análise dos parâmetros que influenciam em sua resistência;
- Realização de testes de flexão e cálculo do módulo de flexão;

- Realização de tratamentos químicos nas fibras do compósito a fim de comparar os resultados com fibras sem tratamento.

Os dois últimos pontos não foram realizados no âmbito deste trabalho devido à impossibilidade de utilização dos laboratórios da ESTIG. Eles estiveram encerrados durante três meses pelo período de confinamento obrigatório para proteção contra a pandemia provocada pelo Covid-19.

---

## Referências

---

- [1] C. T. Herakovich, “Mechanics of composites: A historical review,” *Mech. Res. Commun.*, vol. 41, pp. 1–20, 2012, doi: 10.1016/j.mechrescom.2012.01.006.
- [2] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 8th ed. Wiley, 2009.
- [3] K. K. Chawla, *Composite Materials*, no. EM74-118 Apr 29-May 3 974. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [4] F. Ahmad, H. S. Choi, and M. K. Park, “A Review : Natural Fiber Composites Selection in View of Mechanical , Light Weight , and Economic Properties,” pp. 1–15, 2014, doi: 10.1002/mame.201400089.
- [5] J. Müssig and K. Haag, *The use of flax fibres as reinforcements in composites*. 2015.
- [6] C. Baley, M. Gomina, J. Breard, A. Bourmaud, and P. Davies, “Variability of mechanical properties of flax fibres for composite reinforcement. A review,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 145, no. November, p. 111984, 2020, doi: 10.1016/j.indcrop.2019.111984.
- [7] W. K. Ng, M. Johar, H. A. Israr, and K. J. Wong, “7 - A review on the interfacial characteristics of natural fibre reinforced polymer composites,” in *Interfaces in Particle and Fibre Reinforced Composites*, K. L. Goh, A. M.K., R. T. [De Silva], and S. Thomas, Eds. Woodhead Publishing, 2020, pp. 163–198.
- [8] V. V. Vasiliev and E. V. Morozov, *Mechanics and Analysis of Composite Materials*. 2001.
- [9] L. C. Fontoura, “Modelagem do módulo de Young em nanocompósitos através de inteligência computacional,” Pontifícia Universidade Católica Do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 2009.
- [10] M. Groover, “Fundamentals of Modern Manufacturing Materials,Processes and Systems,” *John Wiley Sons*, p. 493, 2010.



- [11] C. T. Herakovich, *Mechanics of Fibrous Composites*. Wiley, 1997.
- [12] N. Karthi, K. Kumaresan, S. Sathish, S. Gokulkumar, L. Prabhu, and N. Vigneshkumar, “An overview: Natural fiber reinforced hybrid composites, chemical treatments and application areas,” *Mater. Today Proc.*, pp. 1–7, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.011.
- [13] M. A. R. Medeiros, “Propriedades mecânicas de compósitos de PVC reciclado reforçados com fibras de sisal e de nylon,” UFBA, 2006.
- [14] A. Valadez-Gonzalez, J. M. Cervantes-Uc, R. Olayo, and P. J. Herrera-Franco, “Effect of fiber surface treatment on the fiber-matrix bond strength of natural fiber reinforced composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 30, no. 3, pp. 309–320, 1999, doi: 10.1016/S1359-8368(98)00054-7.
- [15] T. E. L. Branquinho, “Processamento e Caracterização de Compósitos com Fillers de Argila Expandida,” p. 102, 2017.
- [16] P. K. Mallick, *Fiber-reinforced composites : materials, manufacturing, and design*, 3rd ed. 2007.
- [17] R. Fernandes Carvalho and C. Calil Júnior, “Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira,” p. 133, 2005, doi: 10.1111/acps.12391.
- [18] N. I. R. Thomas, “Influência de tratamentos superficiais em fibras de licuri na aderência interfacial do compósito com matriz poliéster.,” no. January 2011, p. 234, 2011, doi: 10.13140/RG.2.2.25001.44640.
- [19] K. Joseph, R. D. Tolêdo Filho, B. James, S. Thomas, and L. H. de Carvalho, “a Review on Sisal Fiber Reinforced Polymer Composites,” *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 3, no. 3, pp. 367–379, 1999, doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v3n3p367-379.
- [20] J. M. H. Cavaleiro, “Fabrico e maquinação de compósitos de matriz polimérica com fibras curtas de carbono,” 2018, [Online]. Available: <https://iconline.ipleiria.pt/handle/10400.8/3537>.
- [21] P. Feraboli *et al.*, “Lamborghini ‘Forged Composite’ Technology for the Suspension Arms of the Sesto Elemento,” *26th Annu. Tech. Conf. Am. Soc. Compos. 2011 2nd Jt. US-Canada Conf. Compos.*, vol. 2, no. September 2010, pp. 1203–1215, 2011.

- [22] M. J. Mochane *et al.*, “Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review,” *Express Polym. Lett.*, vol. 13, no. 2, pp. 159–198, 2019, doi: 10.3144/expresspolymlett.2019.15.
- [23] D. Hull and T. W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press, 1996.
- [24] J. Holbery and D. Houston, “Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications,” *Jom*, vol. 58, no. 11, pp. 80–86, 2006, doi: 10.1007/s11837-006-0234-2.
- [25] M. M. Kabir, H. Wang, K. T. Lau, and F. Cardona, “Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 7, pp. 2883–2892, 2012, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.04.053.
- [26] M. J. John and S. Thomas, “Biofibres and biocomposites,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 71, no. 3, pp. 343–364, 2008, doi: 10.1016/j.carbpol.2007.05.040.
- [27] G. G. Silva, D. A. De Souza, J. C. Machado, and D. J. Hourston, “Mechanical and Thermal Characterization of Native Brazilian Coir Fiber,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 76, no. 7, pp. 1197–1206, 2000, doi: 10.1002/(SICI)1097-4628(20000516)76:7<1197::AID-APP23>3.0.CO;2-G.
- [28] R. Mursalin, M. W. Islam, M. Moniruzzaman, M. F. Zaman, and M. Azmain Abdullah, “Fabrication and Characterization of Natural Fiber Composite Material,” *Int. Conf. Comput. Commun. Chem. Mater. Electron. Eng. IC4ME2 2018*, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/IC4ME2.2018.8465655.
- [29] K. L. Pickering, M. G. A. Efendy, and T. M. Le, “A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 83, pp. 98–112, 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.08.038.
- [30] L. P. Barroso, “Estudo das potencialidades do linho na moda contemporânea,” Universidade Da Beira Interior, 2014.
- [31] M. Jakobsen, “All About Linen – The Forgotten Fiber,” 2017. <https://www.heddels.com/2017/01/all-about-linen-the-forgotten-fiber/>.
- [32] F. Bensadoun, K. A. M. Vallons, L. B. Lessard, I. Verpoest, and A. W. Van Vuure, “Fatigue behaviour assessment of flax-epoxy composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 82, pp. 253–266, 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.11.003.

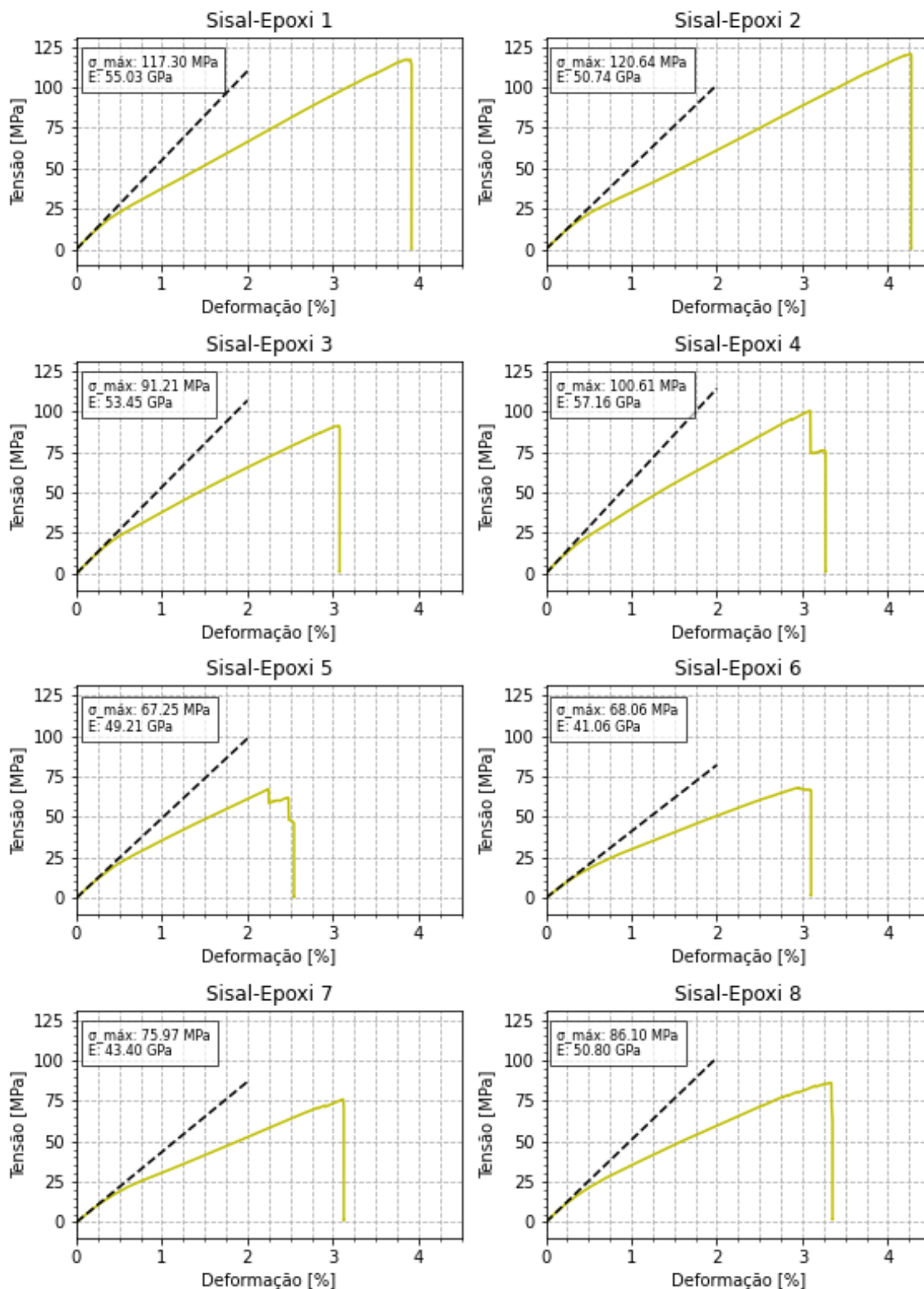
- [33] J. George, J. Ivens, and I. Verpoest, “Mechanical properties of flax fibre reinforced epoxy composites,” *Angew. Makromol. Chemie*, vol. 272, no. 4747, pp. 41–45, 1999, doi: 10.1002/(SICI)1522-9505(19991201)272:1<41::AID-APMC41>3.0.CO;2-X.
- [34] A. K. Bledzki and J. Gassan, “Composites reinforced with cellulose based fibres,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 24, no. 2, pp. 221–274, 1999, doi: 10.1016/S0079-6700(98)00018-5.
- [35] Cordicastro, “Fios Norte,” 2020. <https://cordicastro.pt/produto/fios-norte/> (accessed May 07, 2020).
- [36] Boladefios, “Fio Norte,” 2020. <https://cordicastro.pt/produto/fios-norte/> (accessed May 07, 2020).
- [37] Subhan Ali, N. Jain, and V. K. Singh, “Mechanical Properties of Sisal Fibre Reinforced Composites,” vol. 5, no. September, 2019, p. 31.
- [38] M. C. F. Cunha, P. R. N. da Cavalcante, A. G. S. da Prado, and A. C. C. e. S. da Filho, “Process analysis of cost management of agents that comprise the production chain of culture of sisal in the state of par,” *Custos e Agronegocio*, vol. 7, no. 3, pp. 61–92, 2011.
- [39] Y. Li and Y. O. Shen, *The use of sisal and henequen fibres as reinforcements in composites*. 2015.
- [40] M. A. Sawpan, K. L. Pickering, and A. Fernyhough, “Effect of fibre treatments on interfacial shear strength of hemp fibre reinforced polylactide and unsaturated polyester composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 42, no. 9, pp. 1189–1196, 2011, doi: 10.1016/j.compositesa.2011.05.003.
- [41] M. L. Costa, M. C. Rezende, and L. C. Pardini, “Métodos de estudo da cinética de cura de resinas epóxi,” *Polímeros*, vol. 9, no. 2, pp. 37–44, 1999, doi: 10.1590/s0104-14281999000200011.
- [42] L. A. Carlsson, D. F. Adams, and R. B. Pipes, *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials*. 2014.
- [43] F. L. Jin, X. Li, and S. J. Park, “Synthesis and application of epoxy resins: A review,” *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 29, pp. 1–11, 2015, doi: 10.1016/j.jiec.2015.03.026.
- [44] R. Jeyapragash, V. Srinivasan, and S. Sathiyamurthy, “Materials Today : Proceedings

- Mechanical properties of natural fiber / particulate reinforced epoxy composites – A review of the literature,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.12.146.
- [45] F. de A. Silva, N. Chawla, and R. D. de T. Filho, “Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 68, no. 15–16, pp. 3438–3443, 2008, doi: 10.1016/j.compscitech.2008.10.001.
- [46] S. Parbin, N. K. Waghmare, S. K. Singh, and S. Khan, “Mechanical properties of natural fiber reinforced epoxy composites: A review,” in *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 152, pp. 375–379, doi: 10.1016/j.procs.2019.05.003.
- [47] O. M. L. Asumani, R. G. Reid, and R. Paskaramoorthy, “The effects of alkali-silane treatment on the tensile and flexural properties of short fibre non-woven kenaf reinforced polypropylene composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 43, no. 9, pp. 1431–1440, 2012, doi: 10.1016/j.compositesa.2012.04.007.
- [48] I. Van de Weyenberg, J. Ivens, A. De Coster, B. Kino, E. Baetens, and I. Verpoest, “Influence of processing and chemical treatment of flax fibres on their composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 9, pp. 1241–1246, Jul. 2003, doi: 10.1016/S0266-3538(03)00093-9.
- [49] L. Yan, N. Chouw, and X. Yuan, “Improving the mechanical properties of natural fibre fabric reinforced epoxy composites by alkali treatment,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 31, no. 6, pp. 425–437, Mar. 2012, doi: 10.1177/0731684412439494.
- [50] M. Z. Rong, M. Q. Zhang, Y. Liu, G. C. Yang, and H. M. Zeng, “The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 61, no. 10, pp. 1437–1447, 2001, doi: 10.1016/S0266-3538(01)00046-X.
- [51] N. Venkateshwaran, A. Elaya Perumal, and D. Arunsundaranayagam, “Fiber surface treatment and its effect on mechanical and visco-elastic behaviour of banana/epoxy composite,” *Mater. Des.*, vol. 47, pp. 151–159, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.12.001.
- [52] M. Owen, C. Ogunleye, and E. Achukwu, “Mechanical properties of sisal fibre-reinforced epoxy composites-effect of alkali concentrations,” vol. 5, pp. 26–31, 2015.
- [53] L. Yan, N. Chouw, and X. Yuan, “Improving the mechanical properties of natural

- fibre fabric reinforced epoxy composites by alkali treatment,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 31, no. 6, pp. 425–437, 2012, doi: 10.1177/0731684412439494.
- [54] E. T. N. Bisanda and M. P. Ansell, “The effect of silane treatment on the mechanical and physical properties of sisal-epoxy composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 41, no. 2, pp. 165–178, 1991, doi: 10.1016/0266-3538(91)90026-L.
- [55] P. H. M. Cardoso, “Efeito do Tratamento Alcalino/Mecânico de Fibras de Curauá nas Propriedades de Laminados Compósitos de Matriz Epóxi,” UFRJ, 2014.
- [56] M. K. Buragohain, *Composite structures: Design, mechanics, analysis, manufacturing, and testing*. 2017.
- [57] ASTM, “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 15, pp. 1–13, 2014, doi: 10.1520/D3039.
- [58] ASTM, “Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulation Materials,” *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–11, 2015.
- [59] J. E. Ribeiro, J. Rocha, and L. Queijo, “The Influence of Manufacturing Factors in the Short-Fiber Non-Woven Chestnut Hedgehog Spine-Reinforced Polyester Composite Performance,” *J. Nat. Fibers*, 2019, doi: 10.1080/15440478.2019.1691109.
- [60] J. Rocha, J. E. Ribeiro, and L. Queijo, “Comparison of Mechanical Properties of Polyester Composites Reinforced with Autochthonous Natural Fibres: Flax and Hemp,” in *Advanced Structured Materials*, vol. 65, 2017, pp. 49–63.
- [61] R. Vishnuvardhan, R. R. Kothari, and S. Sivakumar, “Experimental investigation on mechanical properties of sisal fiber reinforced epoxy composite,” *Mater. Today Proc.*, vol. 18, pp. 4176–4181, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.362.
- [62] S. Anidha, N. Latha, and M. Muthukkumar, “Effect of polyaramid reinforced with sisal epoxy composites: Tensile, impact, flexural and morphological properties,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 7947–7954, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.04.081.
- [63] J. Baets, D. Plastria, J. Ivens, and I. Verpoest, “Determination of the optimal flax fibre preparation for use in unidirectional flax-epoxy composites,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 33, no. 5, pp. 493–502, 2014, doi: 10.1177/0731684413518620.

- [64] K. F. Sodoke, L. Laperrière, L. Toubal, and R. S. Khakestar, “Fuzzy logic response to Young’s modulus characterization of a flax-epoxy natural fiber composite,” *Mater. Des.*, vol. 89, pp. 273–285, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.09.165.

# Anexo A – Resultados Sisal/epóxi



## Anexo B – Resultados Linho/epóxi

