



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

THAMINA IRIS RENDEIRO FERNANDES

**EFEITO DO TRATAMENTO QUÍMICO DA POLPA DE CANA-DE-AÇÚCAR  
(*Saccharum officinarum*) NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS  
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS**

Ananindeua – PA  
2025

THAMINA IRIS RENDEIRO FERNANDES

**EFEITO DO TRATAMENTO QUÍMICO DA POLPA DE CANA-DE-AÇÚCAR  
(*Saccharum officinarum*) NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS  
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, do campus universitário de Ananindeua, para a obtenção do grau de Bacharela em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Deibson Silva da Costa.

Coorientador: Me. Eng. Luis Felipe Alencar Brandão.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a)

---

F363e Fernandes, Thamina Iris Rendeiro.  
Efeito do tratamento químico da polpa de cana-de-açúcar  
(Saccharum Officinarum) nas propriedades físicas e  
mecânicas dos compósitos poliméricos. / Thamina Iris  
Rendeiro Fernandes. — 2025.  
80 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa  
Coorientador(a): Prof. Me. Luis Felipe Alencar Brandão  
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade  
Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua,  
Curso de Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2025.

1. Tratamento alcalino. 2. Fibras naturais. 3.  
Microscopia eletrônica de varredura. I. Título.

CDD 620.10640287

---


THAMINA IRIS RENDEIRO FERNANDES

**EFEITO DO TRATAMENTO QUÍMICO DA POLPA DE CANA-DE-AÇÚCAR  
(*Saccharum officinarum*) NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS  
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, do campus universitário de Ananindeua, para a obtenção do grau de Bacharela em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará.


Data da aprovação: 25/03/2025.  
Conceito: EXCELENTE

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **DEIBSON SILVA DA COSTA**  
Data: 16/04/2025 17:01:53-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dr. Deibson Silva da Costa  
(FEMat/CANAN/UFPA – Orientador)

Documento assinado digitalmente  
 **LUIS FELIPE ALENCAR BRANDAO**  
Data: 14/04/2025 13:31:53-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Me. Eng. Luis Felipe Alencar Brandão  
(PPGEC/ITEC/UFPA – Coorientador)

Documento assinado digitalmente  
 **EDINALDO JOSE DE SOUSA CUNHA**  
Data: 16/04/2025 11:36:20-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa Cunha  
(FEMat/CAMPANIN/UFPA – Examinador Interno)

Documento assinado digitalmente  
 **HAIANNY BEATRIZ SARAIVA LIMA**  
Data: 11/04/2025 20:38:22-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Ma. Eng<sup>a</sup>. Haianny Beatriz Saraiva Lima  
(PPGEQ/ITEC/UFPA – Examinadora Externa)

Documento assinado digitalmente  
 **ANA PAULA SOUZA DE SOUSA**  
Data: 11/04/2025 20:45:06-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Ma. Eng<sup>a</sup>. Ana Paula Souza de Sousa  
(PPGEQ/ITEC/UFPA – Examinadora Externa)

“Não fui eu que lhe ordenei? Seja forte e corajoso! Não se apavore, nem se desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”

Josué 1:9.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por sua imensurável bondade e pelo constante apoio. Sua luz me guiou em cada passo dessa jornada, renovando minhas energias nos momentos de cansaço e sempre me lembrando de que Ele está no controle de todas as coisas.

Agradeço toda minha família, especialmente, meu pai, Paulo Sérgio, e a minha mãe, Aline Fernandes, por toda dedicação, paciência e amor. Cada sacrifício feito por vocês sempre teve um único objetivo: o meu bem-estar e o meu crescimento. Sou eternamente grata por cada momento em que estiveram ao meu lado, oferecendo apoio e motivação. Tudo que sou e conquistei até aqui é fruto do amor e ensinamentos que vocês me deram.

Agradeço de coração ao meu noivo Danilo Alberto, por ter me dado apoio constante durante a realização deste trabalho. Nos momentos de pressão, você esteve ao meu lado, com paciência e carinho, me lembrando de que eu era capaz de superar qualquer dificuldade. O seu suporte foi fundamental para eu conseguir concluir essa jornada, e eu sou muito grata por tudo que fez por mim.

Meus sinceros agradecimentos aos laboratórios de Catálise e Biocatálise e ao Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados (LAMPS) pela parceria e suporte oferecidos ao longo deste trabalho. O apoio técnico e a disponibilidade de recursos foram cruciais para que eu pudesse alcançar os resultados necessários para este estudo. Sou muito grata pela oportunidade de realizar parte da pesquisa nesses laboratórios e pelos valiosos aprendizados obtidos.

Aos professores da Faculdade de Engenharia de Materiais, campus Ananindeua, minha profunda gratidão pela contribuição em minha formação acadêmica. Em especial, agradeço ao meu orientador, Professor Dr. Deibson Costa, por sua orientação incansável, apoio contínuo e por sempre me incentivar a dar o melhor de mim. Sua dedicação foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho, e sou muito grata por tudo o que aprendi sob sua orientação. Agradeço ao meu coorientador, Luis Brandão, pela paciência, orientação e pelo apoio durante a execução desse trabalho. Sou imensamente grata às minhas amigas Maria Eduarda, Deborah Júlia e Andreza Dias, que levarei para sempre comigo, em todos os momentos da minha vida. Durante todo o percurso, vocês foram mais do que amigas, foram verdadeiras companheiras de jornada, e sem a presença de vocês, as dificuldades enfrentadas teriam sido ainda

mais intensas. Cada conversa de apoio, cada almoço compartilhado, cada risadas juntas me ajudaram a seguir em frente nos momentos mais difíceis. A amizade de vocês foi essencial para que eu mantivesse o foco e a motivação, mesmo quando as adversidades pareciam imbatíveis. O incentivo e a presença constante de vocês me fizeram perceber que não estava sozinha e que juntas poderíamos superar qualquer desafio. Agradeço de coração por cada momento vivido e por fazerem parte dessa história.

## RESUMO

As fibras provenientes do resíduo da cana-de-açúcar podem ser utilizadas na fabricação de compósitos poliméricos, apresentando vantagens tanto no âmbito ambiental quanto no econômico. Este trabalho teve como proposta avaliar o efeito do tratamento químico das fibras naturais provenientes do bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades de compósitos poliméricos. As fibras foram caracterizadas por análises de sólidos solúveis totais (SST), massa específica e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A fabricação dos compósitos foi realizada manualmente, utilizando moldes de silicone e diferentes proporções de fibras (0%, 1%, 2% e 3%). Os compósitos foram avaliados quanto à massa específica aparente, porosidade, absorção de água e resistência à tração. Os resultados indicaram que o tratamento alcalino removeu impurezas e aumentou a densidade das fibras, além de reduzir a porosidade e a absorção de água nos compósitos. No entanto, o tratamento não resultou em aumento da resistência à tração, sendo que o maior valor obtido (26,246 MPa) ocorreu no compósito com 2% de fibras sem tratamento. Os resultados demonstram que as fibras de bagaço de cana-de-açúcar podem ser utilizadas no desenvolvimento de compósitos mais leves e com menor absorção de água. No entanto, a influência do tratamento alcalino na resistência mecânica deve ser mais investigada para otimizar seu uso como reforço estrutural.

**Palavras-chave:** Fibras naturais, tratamento alcalino, Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

## **ABSTRACT**

Fibers from sugar cane waste can be used in the manufacture of polymer composites, offering advantages in both the environmental and economic spheres. The purpose of this study is to evaluate the effect of chemical treatment of natural fibers from sugarcane bagasse on the properties of polymer composites. The fibres were characterized by analysis of total soluble solids (TSS), specific mass and scanning electron microscopy (SEM). The composites were manufactured manually using silicone molds and different proportions of fibers (0%, 1%, 2% and 3%). The composites were evaluated in terms of apparent specific mass, porosity, water absorption and tensile strength. The results indicated that the alkaline treatment removed impurities and increased the density of the fibers, as well as reducing porosity and water absorption in the composites. However, the treatment did not result in an increase in tensile strength, with the highest value obtained (26.246 MPa) occurring in the composite with 2% untreated fibers. The results show that sugarcane bagasse fibers can be used to develop lighter composites with lower water absorption. However, the influence of alkaline treatment on mechanical strength should be further investigated in order to optimize its use as structural reinforcement.

**Keywords:** Natural fibers, alkaline treatment, Scanning electron microscopy (SEM).

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Exemplos de materiais que compõem os compósitos. ....	22
<b>Figura 2</b> - Classificação dos materiais compósitos. ....	23
<b>Figura 3</b> - Estrutura de um avião Airbus A320. ....	24
<b>Figura 4</b> - Compósitos de fibras naturais utilizados em automóveis. ....	25
<b>Figura 5</b> - Reação de polimerização entre o etileno glicol e o ácido maleico para formação de um poliéster insaturado. ....	27
<b>Figura 6</b> - Estrutura da cadeia molecular da resina poliéster ortoftálica. ....	28
<b>Figura 7</b> - Configuração de orientação das fibras. ....	29
<b>Figura 8</b> - Classificação das fibras naturais. ....	30
<b>Figura 9</b> - Estrutura típica das fibras vegetais. ....	33
<b>Figura 10</b> - Representação esquemática da estrutura da biomassa lignocelulósica. ....	34
<b>Figura 11</b> - Influência da água na interface entre fibra e matriz. ....	35
<b>Figura 12</b> - Representação esquemática da estrutura da cana-de-açúcar. ....	36
<b>Figura 13</b> - Maiores produtores de cana-de-açúcar do mundo. ....	37
<b>Figura 14</b> - Cana-de-Açúcar (a) e Bagaço de cana-de-açúcar (b). ....	38
<b>Figura 15</b> - Pré-tratamento de fibras lignocelulósicas. ....	39
<b>Figura 16</b> - Fluxograma das fases de produção dos compósitos. ....	41
<b>Figura 17</b> - Imagem ilustrativa a) resina poliéster ortofitálica, b) acelerador e c) iniciador. ....	42
<b>Figura 18</b> - Bagaço da cana-de-açúcar disposto na feira local. ....	43
<b>Figura 19</b> - pHmetro de bancada (a) e Refratômetro digital (b). ....	44
<b>Figura 20</b> - Fibras do bagaço de cana-de-açúcar após serem trituradas pelo liquidificador. ....	45
<b>Figura 21</b> - Fibras do bagaço da cana-de-açúcar durante tratamento químico. ....	46
<b>Figura 22</b> - Microscópio Eletrônico de Varredura. ....	47
<b>Figura 23</b> - a) Corpos de prova no molde; b) Corpos de prova prontos para ensaio de tração. ....	48
<b>Figura 24</b> - Dimensões do corpo de prova. ....	50
<b>Figura 25</b> - a) Máquina utilizada no ensaio de tração, b) Corpo de prova rompido após o ensaio. ....	51

<b>Figura 26</b> - Micrografia das fibras in natura. ....	53
<b>Figura 27</b> - Micrografia da fibra tratada com 2% de NaOH. ....	54
<b>Figura 28</b> - Micrografia da fibra tratada com 5% de NaOH. ....	55
<b>Figura 29</b> - Resultado dos ensaios físicos. ....	59
<b>Figura 30</b> - Gráfico de Tensão x Deformação da matriz plena (MP) com os compósitos não tratados. ....	64
<b>Figura 31</b> - Gráfico de Tensão x Deformação da matriz plena (MP) com os compósitos tratados com 2% de NaOH. ....	65
<b>Figura 32</b> - Gráfico de Tensão x Deformação da matriz plena (MP) com os compósitos tratados com 5% de NaOH. ....	65
<b>Figura 33</b> - Gráfico de Tensão x Deformação da matriz plena (MP) em relação aos melhores compósitos de cada serie fabricada.....	66
<b>Figura 34</b> - Gráfico do Limite De Resistência a Tração X Porosidade Aparente. ....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de fibras lignocelulósicas. ....	31
Tabela 2 - Propriedades da resina poliéster ortoftálica.....	42
Tabela 3 - Nomenclatura dos compósitos fabricados. ....	49
Tabela 4 - Resultado das análises do °BRIX e pH. ....	52
Tabela 5 - Resultado dos ensaios físicos. ....	56
Tabela 6 - Resultado dos ensaios mecânicos de tração. ....	61
Tabela 7 - Comparativo dos resultados de tração obtidos com a literatura. ....	68

## LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

Absorção de água (AA)  
Acelerador de Cobalto (CAT-MET)  
American Society for Testing and Materials (ASTM)  
Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)  
Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB)  
Corpo de Prova (CP)  
Densidade Tabelada da Água ( $\rho_{H_2O}$ )  
Departamento de Ciências da Terra e Ecologia (COCTE)  
E Colaboradores (*et al.*)  
Empresa Brasileira Aeronáutica S.A (EMBRAER)  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)  
Espectroscopia de Raios-X por Dispersão de Energia (EDS)  
Fibras de Cana-de-Açúcar Sem Tratamento (FBCA)  
Fibras de Cana-de-Açúcar Tratadas com 2% de NaOH (FBCAT2)  
Fibras de Cana-de-Açúcar Tratadas com 5% de NaOH (FBCAT5)  
Grau BRIX ( $^{\circ}$ BRIX)  
Grau Celsius ( $^{\circ}$ C)  
Hidróxido de Sódio (NaOH)  
Laboratório de Catalise (LABCAT)  
Laboratório de Engenharia Química (LEQ)  
Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados (LAMPS)  
Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LME)  
Limite de Resistencia a Tração (LRT)  
Massa Especifica Aparente (MEA)  
Massa Imersa (MI)  
Massa Seca (MS)  
Massa Úmida (Mu)  
Matriz Plena (MP)  
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)  
Modulo de Elasticidade (ME)  
Norma técnica brasileira (NBR)

**Peróxido de metil-etil-cetona (MEK-P)**

**Porcentagem (%)**

**Porosidade Aparente (PA)**

**Potencial Hidrogeniônico (pH)**

**Universidade Estadual Paulista (UNESP)**

**Universidade Federal do Pará (UFPA)**

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	Justificativa e motivação .....	17
1.2	Objetivos.....	18
1.2.1	Objetivo geral .....	18
1.2.2	Objetivos específicos .....	18
1.2.3	Síntese do trabalho.....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
2.1	Materiais compósitos .....	21
2.1.1	Matriz polimérica.....	25
2.2	Compósitos reforçados com fibras.....	28
2.2.1	Reforços com fibra natural.....	30
2.2.2	Fibra vegetal.....	31
2.3	Cana-de-Açúcar.....	35
2.4	Tratamento químico (Alcalino).....	38
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
3.1	Materiais .....	42
3.1.1	Matriz.....	42
3.1.2	Aquisição do bagaço de cana-de-açúcar .....	43
3.2	Métodos.....	43
3.2.1	Ensaio de determinação de sólidos solúveis totais e pH .....	43
3.2.2	Preparo do bagaço de cana-de-açúcar .....	44
3.2.3	Tratamento químico (Alcalino) .....	45
3.2.4	Determinação da massa específica .....	46
3.2.5	Morfologia das fibras .....	46
3.2.6	Confecção dos compósitos.....	47

3.2.7 Caracterização dos compósitos .....	49
3.2.8 Análise estatística.....	51
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>52</b>
4.1.Determinação dos sólidos solúveis totais .....	52
4.2.Determinação da massa específica.....	53
4.3.Morfologia das fibras .....	53
4.4.Ensaio físicos.....	56
4.5.Ensaio mecânico de tração.....	60
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>69</b>
5.1 Considerações finais .....	69
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	70
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as fibras naturais têm se destacado como uma alternativa viável às fibras sintéticas, impulsionadas pela crescente preocupação ambiental e pela necessidade de reduzir a dependência do petróleo. Além de serem sustentáveis, essas fibras frequentemente apresentam boas propriedades mecânicas, tornando-se uma opção promissora para aplicações estruturais. O grande desafio é garantir que a substituição das fibras sintéticas pelas naturais ocorra sem comprometer significativamente as propriedades mecânicas, térmicas e químicas dos materiais resultantes. (Leite, 2017).

Os materiais compósitos são materiais multifásicos que consistem em duas fases distintas. Estas são denominadas matriz, que é contínua e envolve a outra fase, e a fase dispersa ou fase de reforço. As propriedades dos compósitos provêm das fases constituintes, de sua proporção relativa e da geometria da fase dispersa (Callister Júnior; Rethwisch, 2020).

O uso de fibras naturais como reforço em compósitos enfrenta desafios devido à baixa compatibilidade entre as fibras hidrofílicas e a matriz polimérica hidrofóbica, o que resulta em uma fraca adesão e reduz a transferência de esforços entre os materiais. Para melhorar essa interação, é necessário empregar agentes compatibilizantes ou submeter as fibras a tratamentos químicos que favoreçam a adesão entre a matriz polimérica e o reforço celulósico. (Poletto, 2017).

A matriz pode ser metálica, cerâmica ou polimérica. Essas matrizes são amplamente empregadas na indústria devido à sua versatilidade de formulação e baixo custo quando comparadas com as outras opções disponíveis (Levy Neto; Pardini, 2016).

As fibras do bagaço da cana-de-açúcar, são compostas por lignina, hemicelulose e celulose, podem ser usadas como reforço em compósitos. Embora tenham menor resistência à tração e módulo de elasticidade em comparação com outras fibras naturais, elas são mais resistentes à umidade e se degradam melhor no meio ambiente (Araújo; Martins, 2022).

Este trabalho avaliou a eficácia do tratamento químico com hidróxido de sódio nas fibras do bagaço de cana-de-açúcar, buscando aprimorar sua interação com a matriz polimérica em compósitos reforçados com fibras naturais. As fibras foram tratadas com diferentes concentrações de NaOH e submetidas a caracterizações

físicas, químicas e morfológicas. A influência do tratamento nas propriedades dos compósitos foi analisada por meio de ensaios físicos e mecânicos, permitindo verificar os efeitos da modificação química na adesão fibra-matriz e nas propriedades estruturais do material.

## 1.1 Justificativa e motivação

O Brasil lidera a produção global de cana-de-açúcar, com mais de 8 milhões de hectares dedicados a este cultivo. Isso se deve a produção de etanol, um combustível renovável que tem o potencial de substituir o petróleo e diminuir os danos ao meio ambiente. Devido a isso, a cana-de-açúcar está ganhando cada vez mais relevância no cenário mundial, à medida que a busca por sustentabilidade continua a crescer (Embrapa, 2022).

Atualmente, aproximadamente 85% do resíduo do bagaço da cana-de-açúcar é reutilizado. No entanto, ainda existe uma grande quantidade deste subproduto. Portanto, é desejável encontrar novas aplicações para este material, a fim de reduzir a quantidade de resíduos destinados aos aterros sanitários (Vidyashri *et al.*, 2019).

A produção em larga escala e o descarte inadequado dos resíduos do bagaço de cana-de-açúcar podem ter consequências graves, como a poluição dos recursos hídricos e a propagação de doenças. Para evitar esses impactos ambientais, uma alternativa é fazer a reintegração do bagaço de cana-de-açúcar ao processo produtivo, seja para a geração de energia ou como matéria-prima em outros setores industriais, utilizando suas fibras ou cinzas (Flórez-Orrego, 2018).

Por outro lado, ao utilizar as fibras do bagaço diretamente como reforço em compósitos poliméricos, é possível evitar a emissão de gases do efeito estufa, que podem causar alterações climáticas (Oliveira, 2018). As fibras naturais são hidrofílicas, o que pode dificultar a aderência com a matriz polimérica em compósitos, causando baixa resistência mecânica. Para melhorar a adesão, é comum realizar um tratamento químico utilizando hidróxido de sódio, pois ele torna as fibras menos hidrofílicas e mais propensas a aderir à matriz, resultando em compósitos mais fortes (Paiva, 2018).

A utilização de materiais compósitos tem sido cada vez mais procurada nos setores aeronáutico, aeroespacial e militar devido às suas propriedades químicas, mecânicas e térmicas. Esses setores exigem materiais que atendam às demandas

recentes e superem as limitações dos materiais convencionais, como a massa específica. Os compósitos oferecem flexibilidade de aplicação, possibilitando melhorias em suas propriedades e adaptação às exigências específicas. Para isso, são necessárias pesquisas em novos materiais e aprimoramento dos materiais convencionais (Callister Júnior; Rethwisch, 2020).

Desta forma, este trabalho tem como principal justificativa atribuir valor às fibras obtidas através do bagaço da cana-de-açúcar proveniente do resíduo gerado por comerciantes de uma feira da região metropolitana de Belém. Garantindo assim a esses resíduos a possibilidade de utilização na fabricação de materiais compósitos de matriz poliéster com reforço de fibras naturais. Motivando desta forma o aumento da utilização das fibras naturais afim de diminuir impactos ambientais gerados através dos resíduos provenientes do bagaço da cana-de-açúcar.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Fabricar e caracterizar compósitos poliméricos utilizando fibras naturais provenientes do bagaço de cana-de-açúcar. Utilizando a polpa do bagaço da cana-de-açúcar tanto não tratadas quanto tratadas com 2% e 5% de hidróxido de sódio e avaliar as análises físicas e mecânicas dos compósitos fabricados.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o tratamento químico (alcalino) nas fibras do bagaço de cana-de-açúcar em duas concentrações, 2% e 5% de NaOH;
- Analisar morfologicamente através do Microscópio Eletrônico de Varredura as fibras de cana-de-açúcar *in natura* e tratadas com 2% e 5% de NaOH;
- Fabricar compósitos poliméricos a partir das fibras do bagaço de cana-de-açúcar, variando as proporções em massa para 1%, 2% e 3%, tanto das fibras tratadas quanto das não tratadas;
- Determinar as propriedades físicas de Massa Especifica Aparente (MEA), Porosidade Aparente (PA) e Absorção de Água (AA) dos compósitos fabricados;

- Analisar as propriedades mecânicas dos compósitos fabricados por meio do ensaio de tração, analisando a influência do tratamento químico nessa propriedade.

### 1.2.3 Síntese do trabalho

No tópico 1 a introdução fornece uma visão geral do trabalho, destacando a importância de explorar compósitos reforçados com fibras de cana-de-açúcar. Justifica-se a pesquisa com base na necessidade de desenvolver materiais mais sustentáveis e nas características promissoras das fibras de cana-de-açúcar. Os objetivos são apresentados, incluindo o objetivo geral e os objetivos específicos.

No tópico 2 a revisão bibliográfica apresenta os principais conceitos e materiais relevantes para a pesquisa, começando com uma discussão sobre materiais compósitos. Explora-se a matriz polimérica, com destaque para a resina poliéster e compósitos reforçados com fibras. Diferentes tipos de fibras naturais, incluindo fibras vegetais, são discutidos, com um foco específico na cana-de-açúcar. Além disso, aborda-se o tratamento químico das fibras, como a mercerização, para melhorar suas propriedades.

No tópico 3 os materiais e métodos detalham os materiais utilizados no estudo, incluindo a matriz polimérica e o bagaço de cana-de-açúcar. Os métodos experimentais são descritos passo a passo, desde a aquisição do bagaço de cana até o tratamento alcalino e preparação dos compósitos. Também são delineados os procedimentos para caracterização dos compósitos, incluindo ensaios físicos e mecânicos.

No tópico 4 de resultados e discussões, os resultados dos ensaios são apresentados e discutidos neste capítulo. Inclui a determinação dos sólidos solúveis totais, massa específica, morfologia das fibras e resultados de ensaios físicos e mecânicos de tração. As discussões são interpretadas com o auxílio de gráficos, tabelas e literaturas relevantes sobre o assunto.

No tópico 5 a conclusão resume os principais resultados e conclusões do estudo. São fornecidas considerações finais sobre a eficácia dos compósitos de fibras de cana-de-açúcar e possíveis aplicações. Além disso, são oferecidas sugestões para pesquisas futuras, destacando áreas que merecem mais investigação.

As referências bibliográficas são devidamente detalhadas ao término do trabalho, a fim de atribuir créditos às fontes consultadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Materiais compósitos

Compósitos são materiais que possuem uma estrutura heterogênea, sendo compostos por múltiplas fases que são separadas por uma interface. Essas diferentes fases são combinadas com o objetivo de produzir um material compósito com propriedades estruturais ou funcionais superiores em comparação com os componentes individuais. Os materiais compósitos são amplamente utilizados na fabricação de diversas estruturas, como aeronaves, dispositivos eletrônicos, embalagens, equipamentos médicos, veículos automotivos e espaciais, além de terem aplicação na construção civil, entre outros setores. (Callister Júnior; Rethwisch, 2020).

O propósito fundamental na fabricação de um material compósito consiste em integrar distintos elementos de forma a criar um único material com propriedades aprimoradas em relação aos componentes individuais. Dessa maneira, são encontrados em dispositivos e sistemas contemporâneos compósitos com aplicações ópticas, estruturais, elétricas, optoeletrônicas, químicas e outras áreas (Askeland; Wright, 2019).

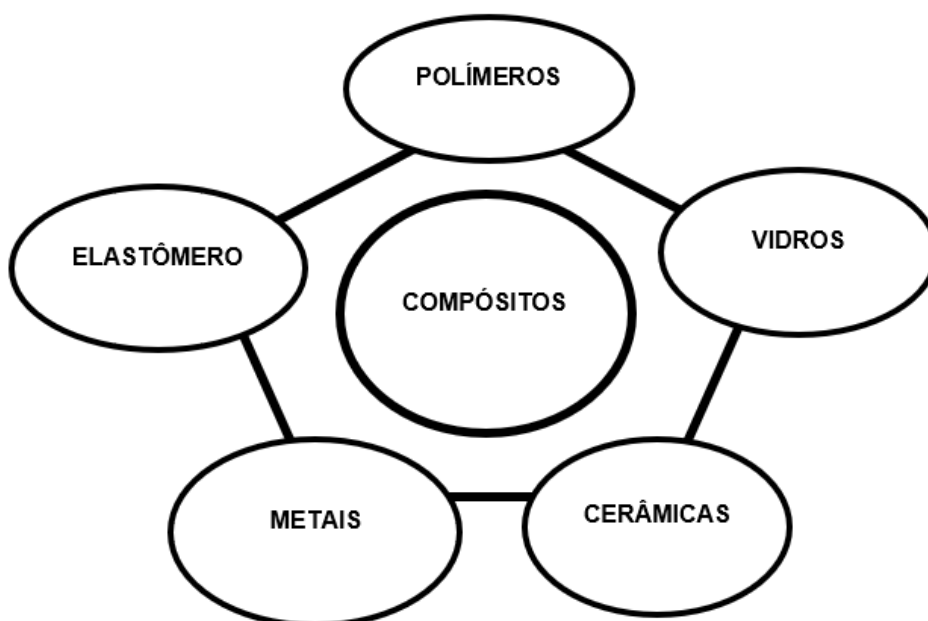
Os compósitos são compostos por duas fases distintas: a matriz e a fase dispersa. A matriz é geralmente um material contínuo que envolve a fase dispersa, que é descontínua. Existem três tipos principais de compósitos em relação à matriz: compósitos de matriz cerâmica, compósitos de matriz polimérica e compósitos de matriz metálica (Levy Neto; Pardini, 2016).

Os compósitos podem ser classificados em três categorias: particulados, fibrosos e laminados. Nos particulados, o reforço ocorre por partículas que podem ser maiores, distribuindo tensões, ou nanométricas, aumentando a resistência. Os fibrosos utilizam fibras contínuas ou curtas para melhorar a resistência mecânica e a flexibilidade. Já os laminados são compostos por camadas sobrepostas de materiais, combinando diferentes propriedades para maior desempenho estrutural. (Callister Júnior; Rethwisch, 2020).

O desempenho dos compósitos depende das propriedades dos materiais, sua distribuição e interação. A adesão entre fibra e matriz polimérica é influenciada pelo volume de fibra, orientação e tipo de matriz. Fibras celulósicas têm tendência a se agregar, dificultando a distribuição uniforme na matriz polimérica (Souza, 2021).

Na Figura 1 está ilustrado como os materiais compósitos são resultados das combinações de outros materiais.

**Figura 1** - Exemplos de materiais que compõem os compósitos.

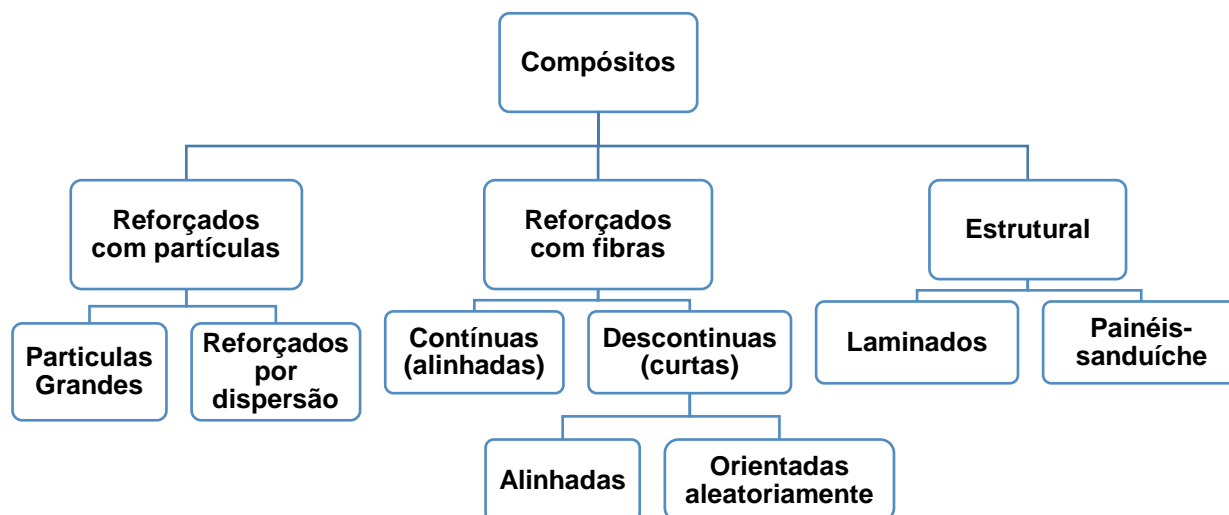


**Fonte:** Adaptado de Becker, 2017.

Entre as diversas categorias de classificação existentes para materiais compósitos, uma delas diz respeito à organização e ao tipo de agente de reforço, incluindo compósitos particulados, compósitos com fibras e compósitos estruturais (Callister Júnior; Rethwisch, 2020).

Este trabalho utilizou os compósitos reforçados com fibras do tipo descontínuas (curtas) e orientadas aleatoriamente. A Figura 2 apresenta uma classificação para os materiais compósitos.

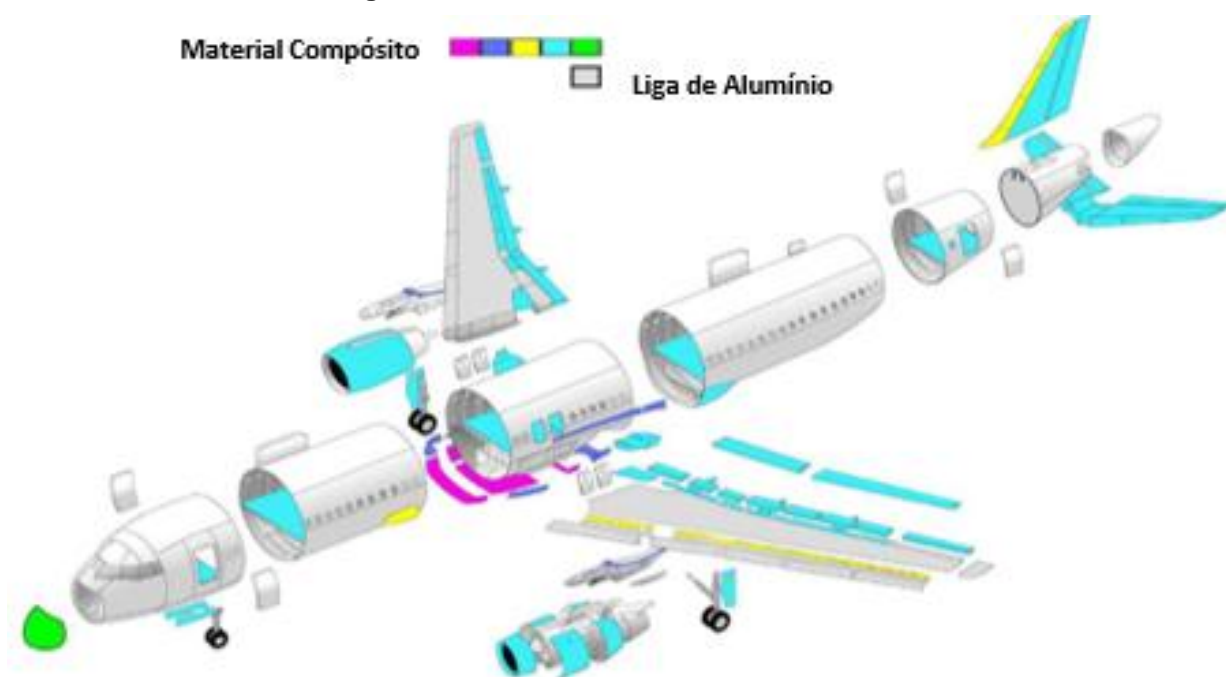
**Figura 2** - Classificação dos materiais compósitos.



**Fonte:** Adaptado de Callister Júnior; Rethwish, 2020.

O avanço tecnológico de aeronaves não se resume meramente a uma vantagem comercial, mas é uma necessidade crítica para manter a competitividade e assegurar oportunidades de emprego. A aplicação de materiais compósitos de alto rendimento em aeronaves tem suas raízes na Segunda Guerra Mundial, quando a fibra de vidro foi empregada na estrutura do B29. Com o passar dos anos, até o ano de 2005, mais de 35% das aeronaves recém-fabricadas nos Estados Unidos eram construídas utilizando materiais compósitos (Schneider, 2018).

O KC-390 é um avião militar desenvolvido em 2019 pela EMBRAER - Empresa Brasileira Aeronáutica S.A. O KC-390 é feito de uma combinação de materiais, incluindo metal e compósitos. Os componentes principais da fuselagem e das asas são feitos de metal, enquanto as superfícies móveis, como flaps e ailerons, são feitas de compósitos. Os compósitos são usados porque são mais leves e mais fortes do que o metal, e também são mais resistentes à corrosão. O uso de materiais compósitos no KC-390 ajudou a reduzir o peso da aeronave, melhorar o desempenho e aumentar a confiabilidade (Silva, 2019). A Figura 3 mostra as principais partes que contêm materiais compósitos na estrutura do avião Airbus A320.

**Figura 3** - estrutura de um avião Airbus A320.

**Fonte:** Hangar MMA, 2020.

As indústrias estão sempre à procura de novos materiais, há uma crescente inserção de fibras vegetais em compósitos com objetivo de reduzir a massa de seus produtos, pois o uso destes materiais é uma das maneiras de melhorar a eficiência energética, mantendo-se os quesitos de sustentabilidade (Bressiani Junior *et al.*, 2020).

A Universidade Estadual Paulista (UNESP) estabeleceu uma parceria com a Volkswagen do Brasil com o propósito de criar compósitos inovadores incorporando fibras vegetais em sua composição. O intuito é empregar esses novos materiais na fabricação de componentes para o acabamento interno dos veículos produzidos pela montadora (Tunes, 2023).

Segundo o Jornal Zero Hora (2017) a Ford da China pesquisa o bambu, para possível matéria-prima sustentável para a produção de componentes automotivos. A montadora Fiat em 2010, apresentou o veículo Uno *Ecology*, um carro com interior composto de fibra de coco nos bancos e as peças plásticas externas, como para-choques, painel, painéis de porta e revestimentos externos, foram produzidas a partir do bagaço de cana-de-açúcar. O novo material possibilitou uma redução do peso das peças de cerca de 8% em relação ao material convencional, feito a partir de petróleo (Fiat, 2024). A Figura 4 exibe as principais fibras vegetais já utilizadas pela indústria automobilística.

**Figura 4** - Compósitos de fibras naturais utilizados em automóveis.



Fonte: Adaptado de Oliveira, 2018.

### 2.1.1 Matriz polimérica

A matriz apresenta diferentes composições e classificações, que variam de acordo com o tipo de material empregado, tais como polímeros, cerâmicas ou metais. Em relação à sua aplicação na construção de estruturas, os polímeros, incluindo termofixos e termoplásticos, destacam-se por sua ampla utilização. Essa preferência é justificada principalmente pela facilidade de moldagem e pela leveza em comparação com outras alternativas. De modo geral, esses materiais costumam ser reforçados com fibras ou partículas para melhorar suas propriedades (Oliveira, 2018; Askeland, 2019).

De acordo com Levy Neto e Pardini (2016), a matriz desempenha funções cruciais no processo de fabricação de um compósito. Essas funções incluem a fixação adequada do reforço, garantindo sua proteção contra danos, bem como a transferência e distribuição eficiente das solicitações recebidas para o reforço. Além disso, em determinadas situações, a matriz pode contribuir para a incorporação de propriedades como ductilidade, dureza e isolamento elétrico.

A matriz possui outra função relevante, que é assegurar a proteção dos reforços contra danos superficiais ocasionados pela abrasão mecânica ou por reações químicas com o ambiente. Tais interações têm o potencial de ocasionar defeitos superficiais capazes de originar trincas, podendo levar a falhas mesmo sob níveis de tensão de tração considerados baixos (Callister Júnior; Rethwisch, 2020).

Compósitos que têm uma matriz metálica encontram diversas aplicações na indústria, especialmente nos setores aeroespacial e automotivo, graças à sua notável resistência a temperaturas elevadas. No entanto, a produção desses compósitos pode ser mais complexa e dispendiosa em comparação com os compósitos de matriz polimérica. Da mesma forma, os compósitos de matriz cerâmica também demonstram um desempenho vantajoso em altas temperaturas e são notavelmente mais leves do que os compósitos metálicos (Oliveira, 2018; Askeland, 2019).

Segundo Lopes (2017), a matriz mais utilizada para materiais compósitos é a polimérica e isso se deve a duas razões:

- I. De maneira geral, as propriedades mecânicas dos polímeros são consideradas insuficientes para diversas aplicações, uma vez que suas resistências são significativamente inferiores se comparadas às de metais e cerâmicas. Isso implica que há um grande potencial de benefício ao empregar o processo de reforço em materiais poliméricos.
- II. O processamento de compósitos poliméricos não requer o uso de altas pressões nem de elevadas temperaturas.

Alguns compósitos com matrizes poliméricas podem contar com a resina polimérica atuando como matriz e fibras desempenhando o papel de reforço. Esses compósitos são amplamente utilizados devido à sua facilidade de produção e baixo custo. Entre eles, podemos citar os compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro, os quais encontram aplicação em carcaças de meios de transporte automotivos e marítimos, tubulações de plástico e outras aplicações industriais (Pavanati, 2015).

#### 2.1.1.1 Resina poliéster

O poliéster pertence a uma classe de polímeros que pode ser obtida através da polimerização em etapas entre anidridos e glicóis, resultando na formação de cadeias

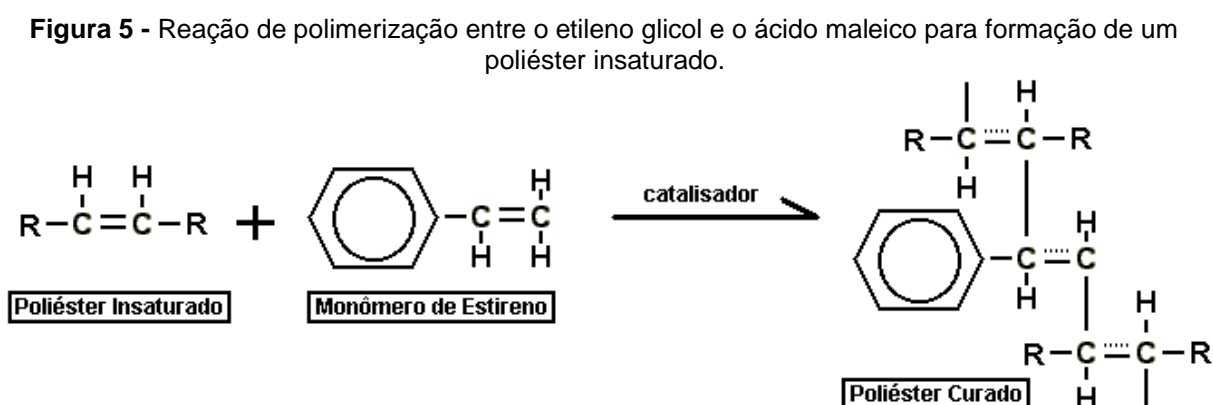
longas e lineares. Esse polímero possui uma grande versatilidade e pode ser encontrado em diferentes formas, como fibras, filmes e resinas. A síntese do poliéster pode resultar em cadeias com duplas ligações (C=C) (insaturação) ou sem elas, classificando-o como saturado (polímero termoplástico) ou insaturado (polímero termorrígido) (Levy Neto; Pardini, 2016).

Os poliésteres podem ser classificados de acordo com os tipos de ácidos que participam da ligação entre os átomos de carbono na cadeia molecular. Essas classificações podem ser divididas em saturadas ou insaturadas (Silaex, 2022).

A síntese do poliéster insaturado pode ser realizada por meio da reação de condensação entre o etileno glicol (álcool) e o ácido maleico, com a produção de água (H<sub>2</sub>O) como subproduto. Esse processo de polimerização em etapas envolve a reação contínua entre os grupos funcionais reativos presentes nas moléculas de etileno glicol e ácido maleico, resultando em um aumento na massa molar conforme a reação prossegue (Merlini, 2021).

Logo, a formação do poliéster insaturado ocorre quando um dos reagentes possui insaturação, representada por ligações duplas na estrutura molecular. No caso do poliéster, a insaturação é encontrada no ácido ou anidrido maleico (Silaex, 2022).

Na Figura 5, é descrito a reação química envolvida na obtenção do poliéster.

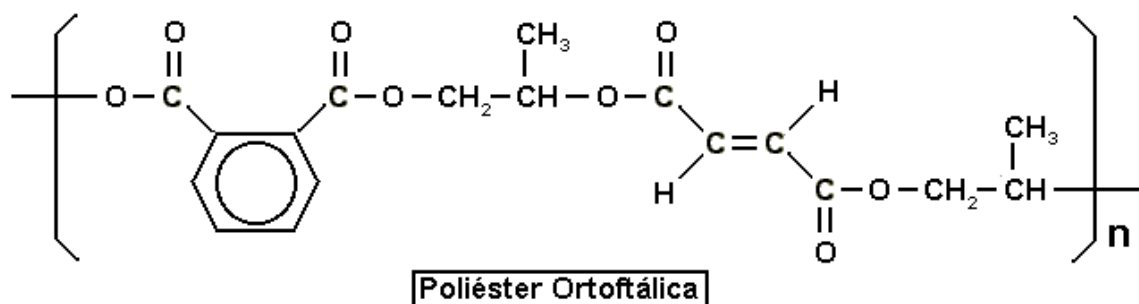


Fonte: Silaex, 2022.

A resina poliéster ortoftálica é constituída por ácidos modificadores, como o ácido ftálico ou seu anidrido. Em comparação com outras resinas, suas propriedades químicas e mecânicas podem ser inferiores devido aos desafios associados à obtenção de polímeros de alto peso molecular. O anidrido ftálico pode regenerar-se a partir dos ésteres do ácido ftálico, resultando em um aumento na presença de

espécies de baixo peso molecular, as quais são mais suscetíveis a ataques químicos (Sakamoto, 2018). A Figura 6 ilustra a estrutura da cadeia molecular da resina poliéster ortoftálica.

**Figura 6** - Estrutura da cadeia molecular da resina poliéster ortoftálica.



Fonte: Silaex, 2022.

Esse tipo de resina é amplamente utilizado devido ao seu baixo custo. Ela se encontra em diversas aplicações, como a produção de reservatórios de água, piscinas, telhas, peças de automóveis, cascos de embarcações e uma variedade de outros produtos que não requerem resistência química (Sakamoto, 2018).

## 2.2 Compósitos reforçados com fibras

Os elementos de reforço, que formam a fase dispersa, são aditivos empregados no compósito com a finalidade de aprimorar suas características mecânicas, eletromagnéticas ou químicas. Em determinados cenários, são empregados outros componentes na fase dispersa que não visam aprimorar as propriedades do compósito, mas desempenham a função de agentes de carga, ampliando o volume do material, reduzindo seu peso e diminuindo o custo (Herzmann, 2022).

Entre os compósitos de maior relevância no campo tecnológico, destacam-se os que possuem a fase dispersa em forma de fibra. Esses compósitos reforçados com fibras visam melhorar a resistência e/ou a rigidez do material (Callister Júnior; Rethwisch, 2020).

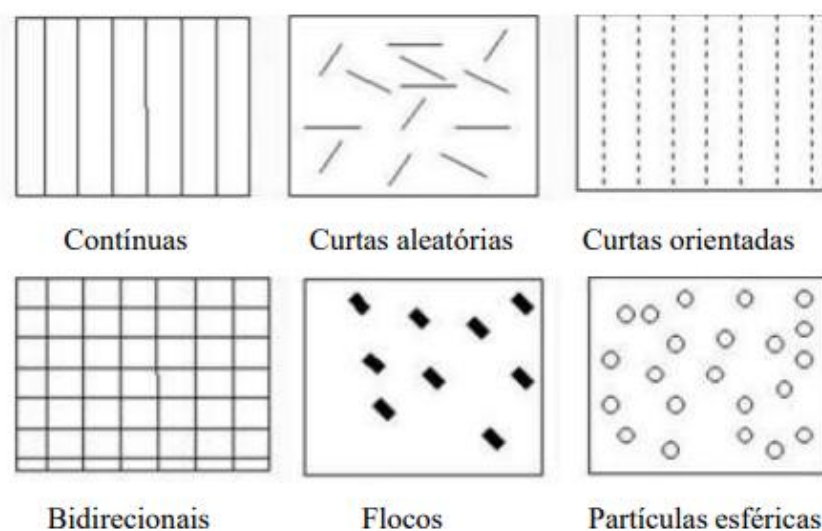
As fibras exibem diversas propriedades que as tornam extremamente atrativas como reforços em compósitos. Um exemplo é que muitos materiais apresentam maior resistência mecânica e rigidez quando dispostos na forma de fibra, em comparação com sua forma de partícula. Essa característica é observada em diversos materiais

amplamente utilizados em compósitos, como fibras de vidro e fibras de carbono, embora as razões subjacentes possam variar dependendo do material em questão (Gibson, 2016).

A proporção em massa de fibras em um material compósito pode atingir até 70%, sendo responsáveis por absorver as tensões suportadas pelo material. Variando em diâmetro e comprimento, as fibras exercem um impacto direto sobre o desempenho do produto. Fibras de menor diâmetro e maior extensão resultam em um aumento no contato (interface) entre a matriz e a carga, contribuindo para a transferência eficaz de tensões para a carga. Como consequência, observa-se um aprimoramento na resistência mecânica (Merlini, 2021).

Na Figura 7 é possível observar de forma simplificada os tipos de arranjos de compósitos reforçados com fibras.

**Figura 7** - Configuração de orientação das fibras.



Fonte: Soares, 2017.

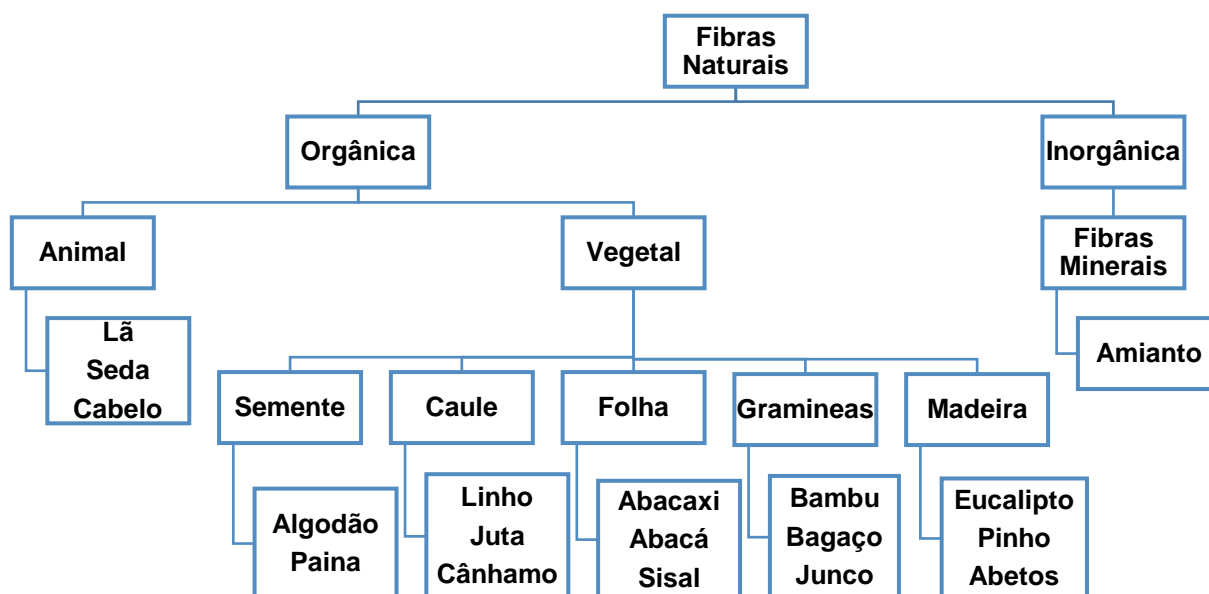
É de suma importância que as forças de adesão entre a fibra e a matriz sejam de magnitude suficientemente elevada para mitigar o desprendimento das fibras. A capacidade de união assume um papel de destaque ao escolher uma combinação adequada entre matriz e fibra. A força máxima do compósito é diretamente influenciada pelo grau dessa união, uma ligação apropriada se torna crucial para otimizar a transferência de tensão de uma matriz com menor resistência para as fibras de maior robustez (Callister Júnior; Rethwisch, 2020).

### 2.2.1 Reforços com fibra natural

As fibras incorporadas em uma matriz polimérica são responsáveis por fornecer força e rigidez ao compósito. Elas transportam a carga para a matriz e mantêm as fibras na posição de orientação. A matriz protege as fibras contra o meio ambiente e possíveis danos. O reforço por fibras em um compósito proporciona uma melhora em algumas propriedades mecânicas, em comparação com o polímero puro. Isso contribui para o grande número de aplicações possíveis dos compósitos, que vão desde a indústria aeroespacial a equipamentos esportivos (Silvestrim, 2018).

A Figura 8 ilustra três possíveis classificações para os tipos de fibras: fibras sintéticas, fibras artificiais e fibras naturais.

**Figura 8** - Classificação das fibras naturais.



Fonte: Adaptado de Santos, 2017.

As fibras naturais são categorizadas como orgânicas ou inorgânicas. As fibras de natureza orgânica são classificadas em vegetais e animais. Por outro lado, as fibras inorgânicas correspondem às fibras minerais. Estas últimas derivam de rochas que possuem uma estrutura fibrosa e são principalmente compostas por silicatos. Um exemplo de fibra mineral é o amianto (Santos, 2017).

As fibras vegetais têm benefícios em relação às fibras sintéticas, por serem renováveis, recicláveis, de baixo custo, biodegradáveis e neutras em relação à

emissão de CO<sub>2</sub>. No entanto, enfrentam desafios como variação nas propriedades mecânicas, baixa estabilidade dimensional, sensibilidade a fatores ambientais e influências de fatores como solo, colheita e processamento. (Levy Neto; Pardini, 2016).

### 2.2.2 Fibra vegetal

As fibras vegetais também recebem a denominação de fibras lignocelulósicas. A categorização ocorre conforme a espécie de origem e a localização específica na planta de onde são obtidas (como folhas, frutos, caules etc.). Essas fibras são compostas por três componentes macroscópicos: celulose, lignina e hemicelulose (Lazarini, 2020).

A Tabela 1 contém a composição de diferentes fibras vegetais, algumas aplicadas como reforços em matriz polimérica.

Tabela 1 - Composição química de fibras lignocelulósicas.

<b>Fibras</b>	<b>Celulose (em peso)</b>	<b>Hemicelulose (peso %)</b>	<b>Lignina (peso %)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Curauá	73.6	9.9	7.5	900	1100
Bagaço de cana	55.2	16.8	25.3	350	1700
Kenaf	72	20.3	9	450	1500
Juta	61 – 71	14 – 20	12 – 13	393 – 773	1300
Sisal	65	12	9.9	511 – 635	1500
Abacá	56 – 63	20 – 25	7 – 9	212	1700
Coco	36 – 46	0.15 – 0.25	41 – 45	131 – 175	1150

**Fonte:** Adaptado de Del Pino *et al*, 2021.

Durante os últimos anos, houve um aumento no uso de fibras lignocelulósicas como reforço para materiais poliméricos. Essas fibras têm sido estudadas, a fim de se tornar uma alternativa para diminuir o uso de fibras sintéticas, especialmente as de vidro, em compósitos utilizados em diferentes setores industriais, como o automotivo e a construção civil. De acordo com Lopes (2017), esses materiais apresentam diversas vantagens quando comparados aos materiais tradicionais. Algumas dessas vantagens incluem:

- Ser proveniente de fonte renováveis;
- Disponibilidade contínua;
- Biodegradabilidade;
- Baixo custo;
- Baixa densidade;
- Propriedades específicas interessantes (acústica e térmica).

Segundo Pereira (2018), a utilização de fibras naturais apresenta algumas desvantagens, sendo elas:

- Absorção de umidade;
- Menores propriedades de resistência;
- Pouca resistência à chama;
- Menor durabilidade;
- Variação de qualidade de acordo com clima;
- Temperatura de processamento limitada.

Embora as fibras naturais provenientes de plantas tenham procedências distintas, elas possuem uma microestrutura e componentes químicos bastante similares, incluindo celulose, hemicelulose, lignina, pectina e cera em diversas concentrações (Parameswaranpillai *et al.*, 2021).

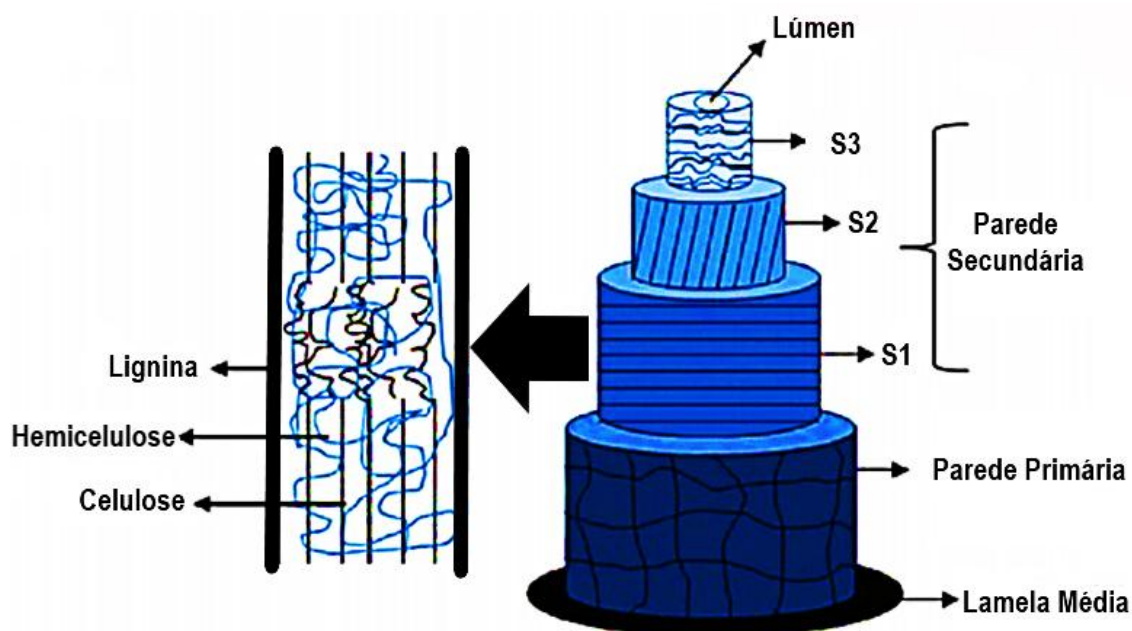
As fibras de origem vegetal possuem um comprimento significativamente maior do que sua largura, e esses comprimentos podem variar. No mercado, as fibras são filamentos compostos por feixes de células fibrosas. Essas células fibrosas individuais são mantidas juntas e conectadas às partes adjacentes da planta por meio de pectina. Cada célula fibrosa individual tem uma estrutura complexa, composta por paredes celulares que envolvem o lúmen (Pereira *et al.*, 2015).

As paredes das fibras vegetais são compostas por várias camadas, que são nomeadas em ordem, de fora para dentro: primária, secundária, terciária e assim por diante. Essas paredes são formadas por camadas de microfibrilas dispostas em espiral, com diferentes orientações angulares (Santos, 2017).

A Figura 9 ilustra a estrutura das fibras vegetais, que consiste em um canal central chamado lúmen, responsável pelo transporte de água e nutrientes, e a parede

celular. A parede celular de cada fibra é formada por várias camadas, incluindo a lamela média, a parede primária fina e a parede secundária, que é subdividida em parede secundária externa (S1), parede secundária média (S2) e parede secundária interna (S3). Essas camadas são compostas por microfibrilas orientadas em ângulos específicos de acordo com cada camada (Pereira *et al.*, 2015).

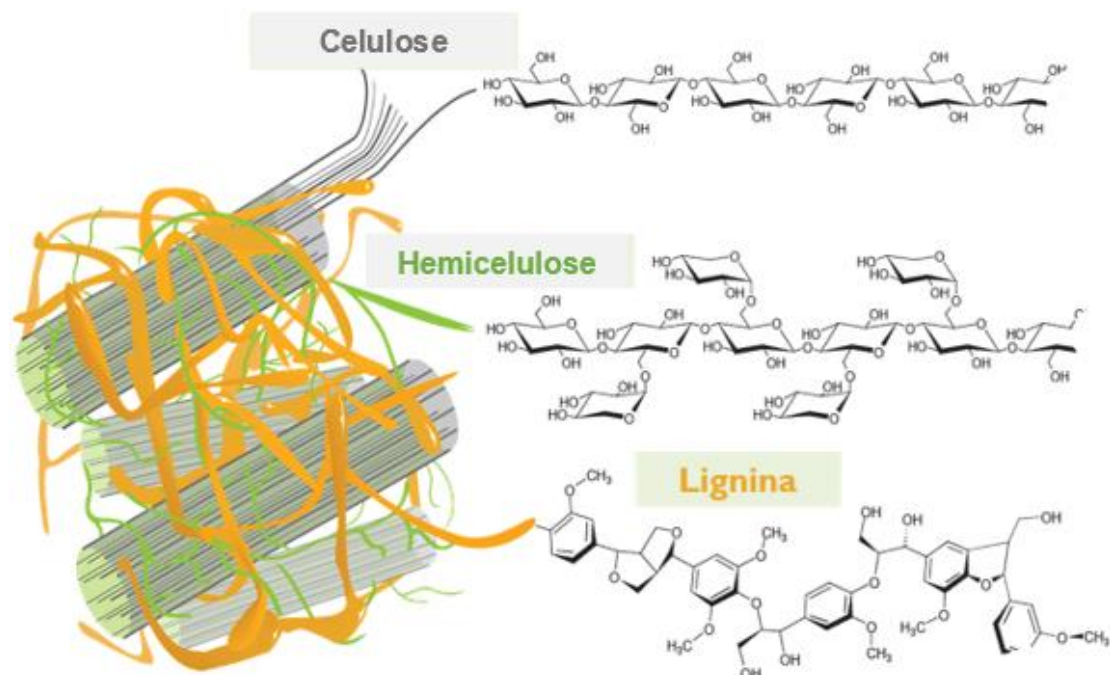
**Figura 9** - Estrutura típica das fibras vegetais.



**Fonte:** Adaptado de Pereira *et al.*, 2015.

A lignina é um polímero complexo que dá rigidez às plantas, pois é um componente importante da parede celular das fibras vegetais. A celulose, por outro lado, é um polissacarídeo que forma a maior parte da célula vegetal. Os polissacarídeos que estão integrados à celulose são chamados de hemicelulose (Minotto *et al.*, 2018). A Figura 10 exibe uma representação esquemática da estrutura da biomassa lignocelulósica.

**Figura 10** - Representação esquemática da estrutura da biomassa lignocelulósica.



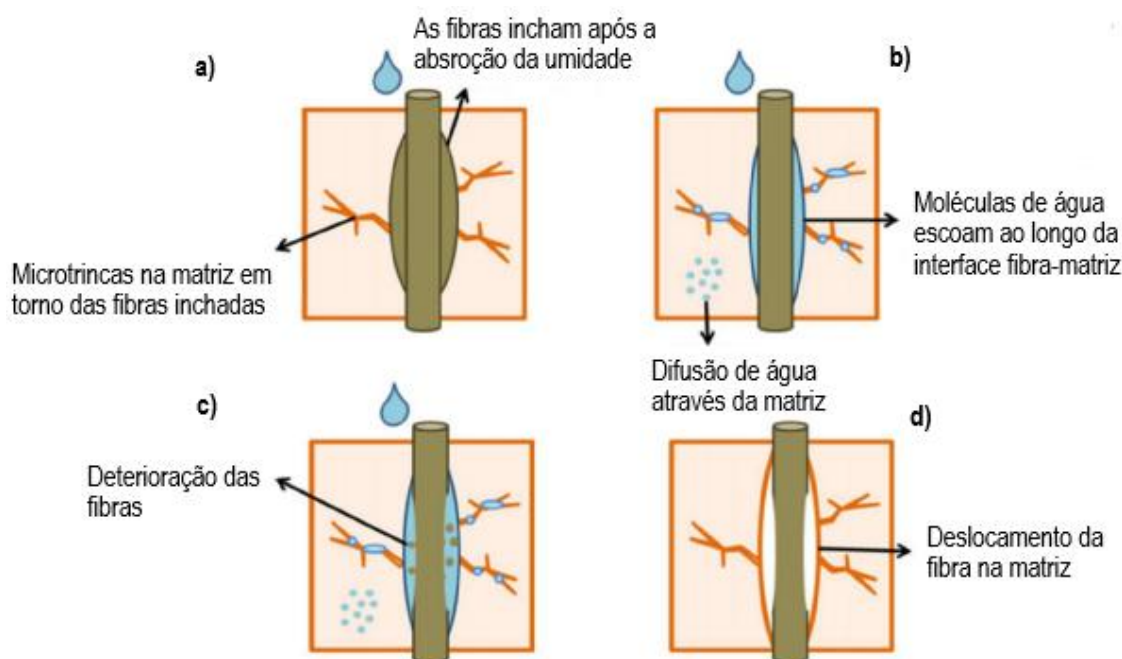
**Fonte:** Adaptado de Di Fidio, 2021.

Os compósitos reforçados com fibras vegetais têm uma maior capacidade de absorver água em comparação com os compósitos reforçados com fibras sintéticas. Como esses materiais podem estar expostos à umidade ou até mesmo submersos em água durante o uso, os estudos sobre a absorção de água são de grande interesse acadêmico (Santos, 2020).

A lignina e celulose interagem de maneira diferente com a água. A lignina pode absorver mais água devido à sua estrutura amorfa, enquanto a celulose apresenta maiores restrições à absorção de umidade. A propriedade de hidratação da fibra depende da sua capacidade de se ligar à água, reter água e inchar. O arranjo físico macroscópico da fibra é o principal fator que contribui para o seu maior inchaço com a água. Além disso, o tamanho e a forma da fibra também influenciam sua capacidade de absorção de água (Fornari Junior, 2017).

Quando um compósito com fibras naturais é exposto à umidade, a água se conecta às fibras, enfraquecendo a ligação entre elas e a matriz. Isso acontece porque as fibras absorvem a umidade, causando tensões e fissuras na matriz. Essas fissuras permitem que a umidade se espalhe, levando à deterioração das fibras e eventual separação das fibras e matriz (Santos, 2020). A Figura 11 ilustra o impacto da água na interface da fibra com a matriz de forma esquemática.

**Figura 11** - Influência da água na interface entre fibra e matriz.



Fonte: Adaptado de Santos, 2020.

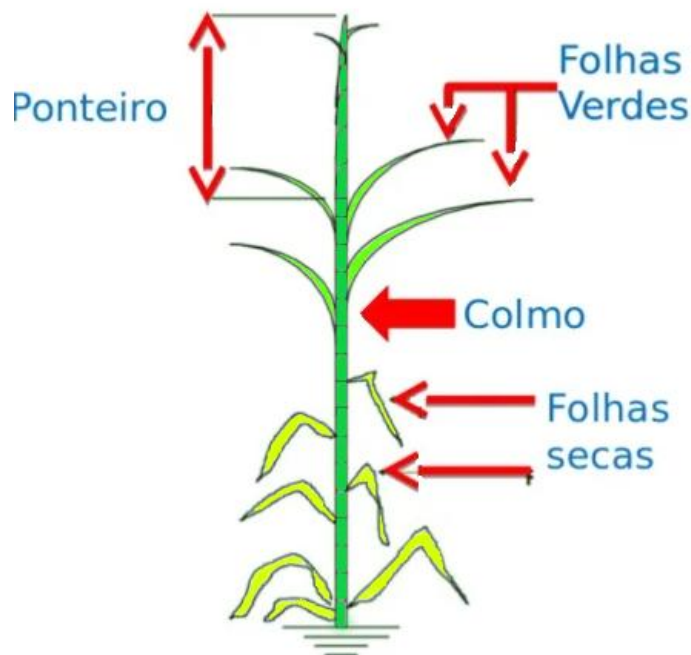
## 2.3 Cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma planta, gramínea da classe das monocotiledôneas, originária do território asiático e foi introduzida no Brasil pelos portugueses no início do século XVI. Martim Affonso de Souza trouxe a primeira muda de cana ao Brasil em 1532 e iniciou seu cultivo na Capitania de São Vicente, onde ele próprio construiu o primeiro engenho de açúcar (Santana, 2019).

A cana-de-açúcar possui forma fina e cilíndrica, folhas grandes e altura de até seis metros, com caule doce. Ela gera elementos vitais para o comércio global: etanol e sacarose. A sacarose é essencial na nutrição humana, enquanto o etanol é usado em bebidas e principalmente como biocombustível. A extração é simples, com trituração para líquido usado na fervura ou fermentação. Na fervura, o excesso de água evapora, concentrando a sacarose, que é filtrada, concentrada e separada da água por centrifugação, obtendo cristais. No refinamento, açúcares puros passam por clarificação e refinamento. O etanol é produzido via fermentação por bactérias que consomem açúcar e geram álcool (Nogaroto, 2023).

A Figura 12 mostra uma representação esquemática da estrutura da Cana-de-Açúcar.

**Figura 12** - Representação esquemática da estrutura da cana-de-açúcar.

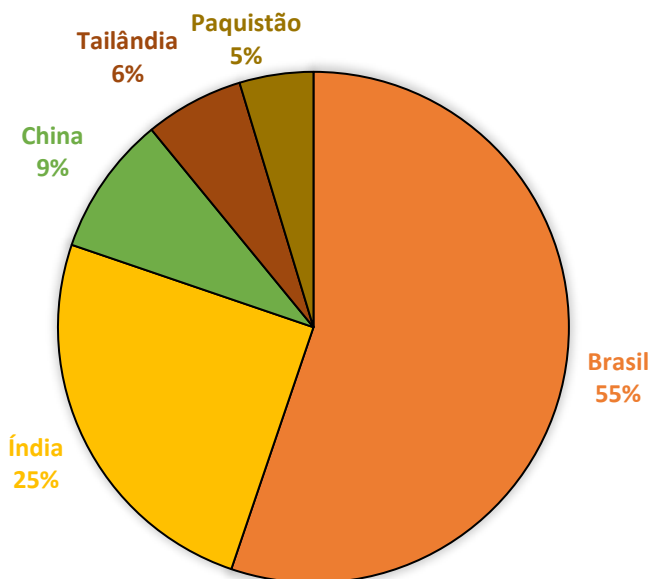


**Fonte:** Adaptado de Rodrigues, 2015.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com mais de sete milhões de hectares plantados, produzindo mais de 480 milhões de toneladas de cana. Isso coloca o país na liderança mundial em tecnologia de produção de etanol. Além de matéria-prima para a produção de açúcar e álcool, seus subprodutos e resíduos são utilizados para cogeração de energia elétrica, fabricação de ração animal e fertilizante para as lavouras (Embrapa, 2022).

A cana-de-açúcar é cultivada em todo o mundo. Ela é uma fonte de muitos produtos, incluindo açúcar, melado, biocombustíveis, bebidas alcoólicas e produtos químicos de base biológica. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido pela Índia. Juntos, esses dois países produzem mais de 55% da cana-de-açúcar cultivada no mundo (Cardoso *et al*, 2018).

Na Figura 13 são mostrados os 5 maiores produtores de cana-de-açúcar do mundo.

**Figura 13** - Maiores produtores de cana-de-açúcar do mundo.

**Fonte:** Yara Brasil, 2023.

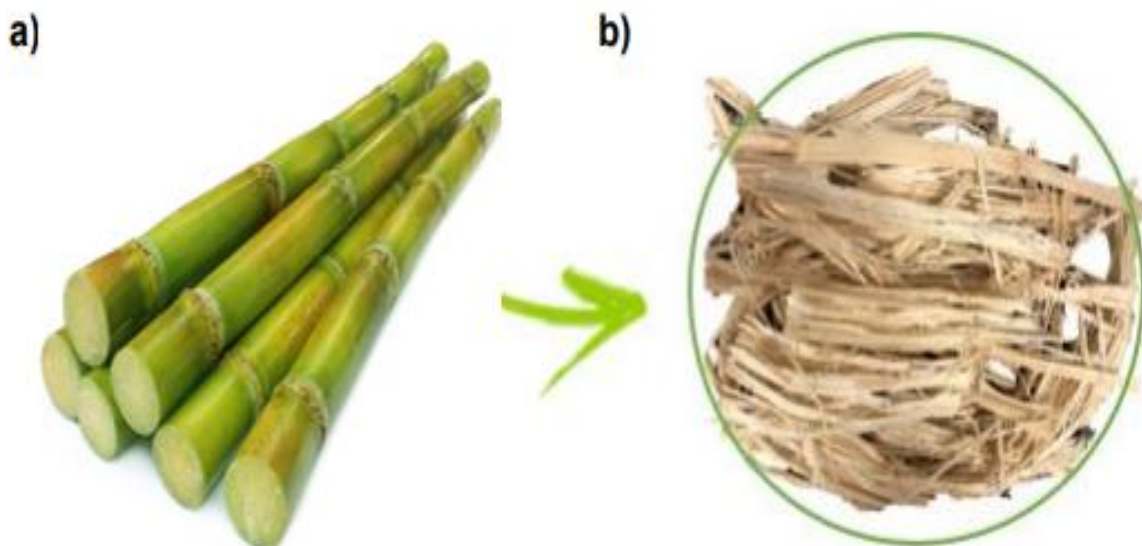
A produção de cana-de-açúcar do Pará cresceu 12,3% em 2023, chegando a 24,5 milhões de toneladas. A maior parte da produção foi destinada à produção de açúcar e etanol, e atingiu 1,5 milhão de toneladas e 2,5 bilhões de litros, respectivamente. O setor emprega cerca de 100 mil pessoas e gera um faturamento anual de R\$ 10 bilhões. A cana-de-açúcar também é uma importante fonte de divisas para o Estado, com exportações que chegam a R\$ 2 bilhões por ano. A safra de cana-de-açúcar de 2023 foi um importante impulso para a economia do Estado do Pará, gerando emprego, renda e divisas, contribuindo para o desenvolvimento do Estado (Conab, 2023).

O bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo fibroso lignocelulósica que é gerado durante o processo de esmagamento dos colmos de cana para extração do seu caldo. É um subproduto das usinas de açúcar e álcool e é estimado que o Brasil produziu 161 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar durante a safra de 2019/2020 (Zamboni, 2022).

O bagaço de cana-de-açúcar é um subproduto da indústria açucareira que contém alta concentração de celulose, hemicelulose e lignina. Esses componentes são importantes para a produção de etanol de segunda geração, que é um biocombustível produzido a partir de resíduos agrícolas (Chandel *et al.*, 2019).

A Figura 14 exibe a cana-de-açúcar (a) e o bagaço de cana-de-açúcar (b).

**Figura 14** - Cana-de-Açúcar (a) e Bagaço de cana-de-açúcar (b).



**Fonte:** Souza, 2021.

O bagaço de cana é um resíduo agrícola que pode ser usado como fonte de energia, mas se descartado de forma inadequada, pode se tornar um poluente ambiental. O bagaço pode contaminar águas, gerar poeira e odores desagradáveis, e até mesmo entrar em combustão espontânea (Chandel *et al.*, 2019).

O bagaço de cana-de-açúcar é o principal subproduto da cana-de-açúcar, representando até 30% da cana moída. Por isso, é importante buscar alternativas para o reaproveitamento do bagaço, como a produção de areia de bagaço, que pode ser usada na construção civil e na preservação ambiental (MEC, 2017; Alves, 2021).

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais, como as fibras do bagaço de cana-de-açúcar, estão ganhando destaque devido às vantagens oferecidas pelas fibras naturais, como baixo custo, origem natural, elevado desempenho, baixa densidade, fonte renovável, baixa abrasividade e não toxicidade (Coelho *et al.*, 2020).

## 2.4 Tratamento químico (Alcalino)

As fibras vegetais são altamente hidrofílicas, o que significa que elas atraem água. Isso é um problema para o desenvolvimento de compósitos poliméricos, pois as matrizes termoplásticas são geralmente repelentes à água. A falta de afinidade entre a fibra e a matriz resulta em uma ligação frágil, que pode levar à absorção de umidade e ao declínio das propriedades mecânicas (Litaiff, 2023).

Além disso, a acumulação potencial de tensões ou a presença excessiva de umidade também podem afetar a qualidade mecânica dos compósitos resultando em uma diminuição da força de ligação na interface, levando à instabilidade dimensional, rachaduras na matriz e propriedades mecânicas pobres dos compósitos (Tavares *et al.*, 2020).

O tratamento alcalino, também conhecido como tratamento alcalino, é um dos métodos de tratamento químico mais utilizados em fibras vegetais. Geralmente este tratamento faz uso do Hidróxido de Sódio – NaOH (Furtado *et al.*, 2020).

O tratamento alcalino modifica a estrutura molecular celulósica. Isso promove o acesso para penetrar produtos químicos, causando reação com moléculas de água e movendo-as para fora da estrutura da fibra. As moléculas de água reativas restantes formam ligações entre a fibra, a célula, o oxigênio e o sódio. Este processo aumenta a propriedade de resistência à umidade das fibras devido à redução dos grupos hidrofílicos. O tratamento alcalino também aumenta a rugosidade superficial, causada pela ruptura da ligação de hidrogênio na estrutura da rede. Conseqüentemente, há melhora nas propriedades mecânicas dos compósitos (Rebello *et al.*, 2019).

O pré-tratamento das fibras é um processo que quebra e remove a lignina e as hemiceluloses. Isso diminui a densidade e a rigidez da região interfibrilar, permitindo que as fibrilas se reorganizem na direção de deformação mecânica (Santos, 2020).

A Figura 15 representa esquematicamente o que ocorre no processo de tratamento alcalino.

**Figura 15** - Pré-tratamento de fibras lignocelulósicas.



**Fonte:** Souza, 2021.

O tratamento com solução aquosa de NaOH pode reduzir o diâmetro da fibra e aumentar a relação entre comprimento e diâmetro. Isso aumenta a área efetiva da superfície da fibra, melhorando a sua adesão à matriz polimérica. No entanto, se a concentração de NaOH for muito alta, pode ocorrer o excesso de deslignificação, o que enfraquece a fibra (Bartos *et al*, 2020).

O tratamento alcalino é um processo que resulta em benefícios consideráveis para a aplicação das fibras vegetais como agente de reforço em compósitos poliméricos. Na literatura, são encontrados diversos estudos que relatam uma melhora nas propriedades físico-químicas de compósitos reforçados com fibras mercerizadas.

Lazarini (2020), estudou o efeito do pré-tratamento de fibras de bagaço de cana-de-açúcar com hidróxido de sódio (NaOH) e ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) na morfologia, propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos com resina epóxi. Ele concluiu que o pré-tratamento melhorou a adesão interfacial entre as fibras e a matriz, aumentando a resistência à tração e ao impacto dos compósitos.

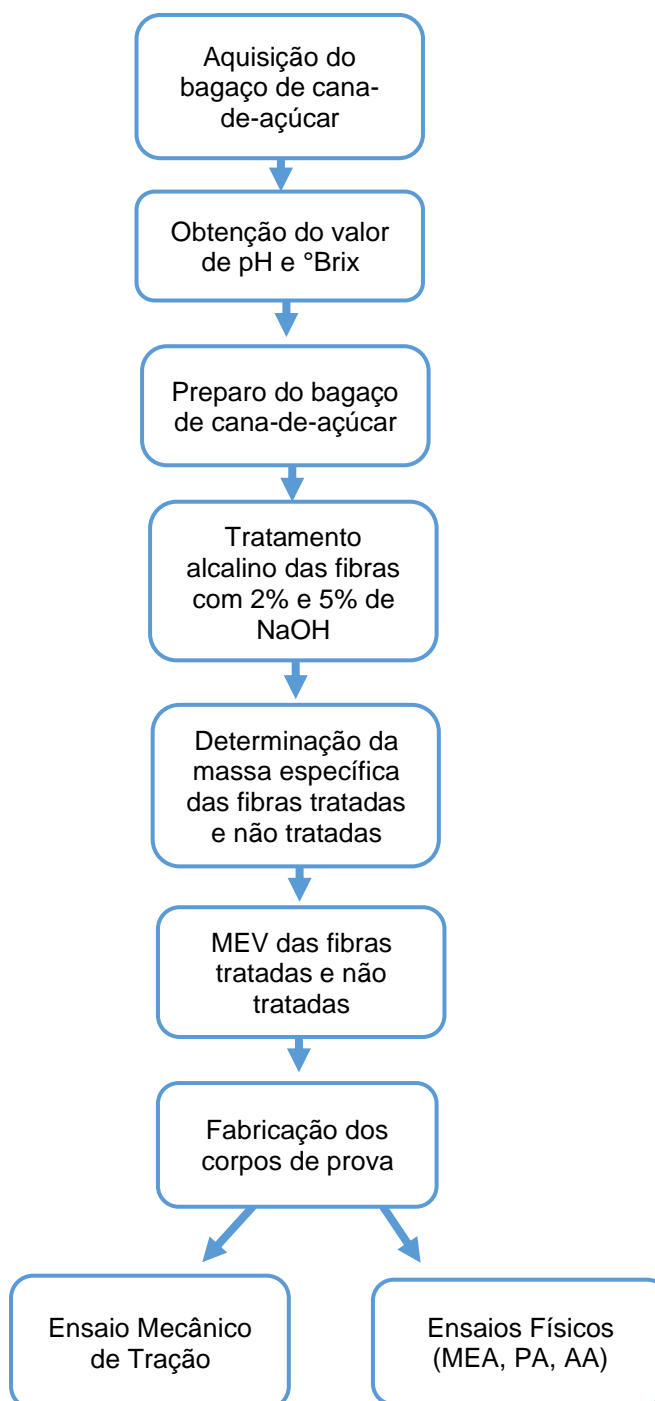
Rani *et al.* (2017), usaram tratamento alcalino para limpar o bagaço de cana-de-açúcar e tirar nanofibras de celulose dele. Eles misturaram essas nanofibras com amido e fizeram nanocompósitos. Eles testaram os nanocompósitos e descobriram que eles tinham boas propriedades para fazer embalagens que não poluem o ambiente. O tratamento alcalino foi importante para deixar as nanofibras mais puras e cristalinas, o que ajudou a melhorar os nanocompósitos.

El-Baky *et al.* (2021), fizeram compósitos híbridos de bagaço de cana-de-açúcar, fibras de vidro e resina de poliéster. Foi realizado o tratamento alcalino para limpar e desfibrilar as fibras do bagaço de cana. As propriedades mecânicas dos compósitos foram medidas e comparadas com os compósitos sem tratamento alcalino ou sem fibras de vidro. O tratamento alcalino melhorou a adesão entre as fibras e a resina, e que os compósitos híbridos eram mais fortes, rígidos e resistentes do que os outros. O autor sugere que esses compósitos podem ser utilizados em várias aplicações industriais.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os compósitos foram fabricados no Laboratório de Catálise situado no bloco de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará – UFPA. A Figura 16 exibe um fluxograma com as principais fases de produção dos compósitos, desde a aquisição do resíduo de cana-de-açúcar até as análises dos testes realizados.

**Figura 16** - Fluxograma das fases de produção dos compósitos.



**Fonte:** Elaborado pela Autora, 2025.

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Matriz

A matriz polimérica selecionada para esta pesquisa foi a resina de poliéster ortoftálica, cuja densidade varia entre 1,10 e 1,20 g/cm<sup>3</sup> conforme as especificações do fabricante. O sistema de catálise empregado envolveu o uso do acelerador à base de cobalto (CAT-MET) em uma proporção de 1,5% (volume/volume), juntamente com o iniciador BUTANOX M-50 – peróxido de metil etil cetona (MEK-P) – na proporção de 1% (volume/volume). A Tabela 2 apresenta as informações fornecidas pelo fabricante da resina poliéster ortoftálica utilizada.

Tabela 2 - Propriedades da resina poliéster ortoftálica.

Propriedade	Medida	Unidade
Massa específica a 25 °C	1,10 - 1,20	g/cm <sup>3</sup>
Viscosidade Brookfield a 25 °C	250 - 350	cP
Pico Exotérmico	160 - 190	°C
Tixotropia	Min 1	-
Teor de Sólidos	54-58	%

Fonte: Adaptado de Redelease, 2023.

Na Figura 17 apresenta a imagem ilustrativa da a) resina poliéster ortoftálica, do b) acelerador de cobalto (CAT-MET) e o c) iniciador BUTANOX M-50 – peróxido de metil etil cetona - (MEK-P) utilizados neste trabalho.

Figura 17 - Imagem ilustrativa a) resina poliéster ortoftálica, b) acelerador e c) iniciador.



Fonte: Adaptado de Redelease, 2021; Du Latex, 2023.

### 3.1.2 Aquisição do bagaço de cana-de-açúcar

Para a fase de reforço foi utilizado as fibras do bagaço de cana-de-açúcar. O bagaço foi doado por um vendedor de caldo de cana-de-açúcar que fica localizado em uma feira no bairro da Cidade Nova VI na região metropolitana de Belém do Pará. A cana-de-açúcar utilizada por este vendedor é proveniente do município de Igarapé-Açu no estado do Pará. A Figura 18 mostra o bagaço da cana-de-açúcar disposto na barraca do vendedor de caldo de cana.

**Figura 18** - Bagaço da cana-de-açúcar disposto na feira local.



**Fonte:** Elaborado pela Autora, 2025.

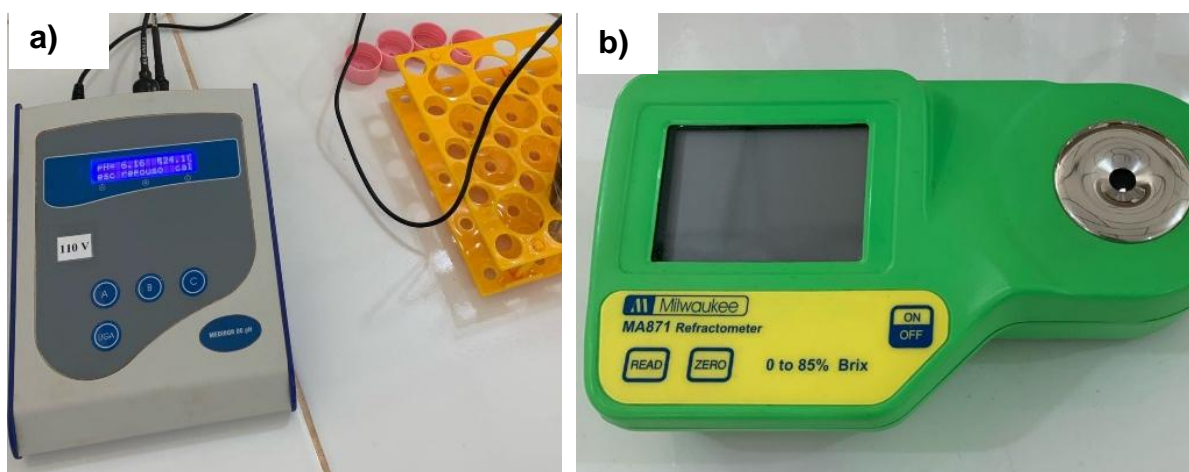
## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Ensaio de determinação de sólidos solúveis totais e pH

Antes de realizar o ensaio para determinação do °Brix, o bagaço de cana-de-açúcar adquirido foi mantido em água corrente por 5 minutos para retirar possíveis impurezas e o excesso de sacarose. Em seguida, o bagaço foi alocado em um recipiente com 20 litros de água destilada, onde permaneceu por 72h. A cada 24h, uma amostra de água era coletada e o restante era desprezado.

Para determinar se o bagaço de cana-de-açúcar ainda continha impurezas e sacarose, foi realizada uma análise dos sólidos solúveis por meio da medição do °Brix (Teodoro, 2022). Para isto foi utilizado um refratômetro da marca Milwaukee, modelo MA871. Também foi realizada a medição do pH durante o ensaio pois o pH influencia na refração da luz e na densidade da solução, que são os princípios usados pelos refratômetros e densímetros para medir o °Brix (Mettler Toledo, 2023). O pHmetro utilizado foi da marca TECNOPOM modelo MPA-210. A Figura 19 mostra o equipamento utilizado para a medição do pH e °Brix.

**Figura 19** - pHmetro de bancada (a) e Refratômetro digital (b).



**Fonte:** Elaborado pela Autora, 2025.

### 3.2.2 Preparo do bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço de cana-de-açúcar foi triturado utilizando um liquidificador doméstico da marca Oster, modelo Osterizer 4126. O processo de trituração ocorreu ao longo de 50 minutos, com intervalos regulares de 5 minutos para prevenir o sobreaquecimento do aparelho. Durante esses momentos de pausa, as fibras passaram por peneiras. As fibras que foram retidas na peneira com abertura de 35 *mesh*, foram selecionadas como o material de estudo para esta pesquisa.

A Figura 20 apresenta as fibras do bagaço de cana-de-açúcar após serem submetidas ao processo de trituração por meio de um liquidificador.

**Figura 20** - Fibras da polpa do bagaço de cana-de-açúcar após serem trituradas pelo liquidificador.



**Fonte:** Elaborado pela Autora, 2025.

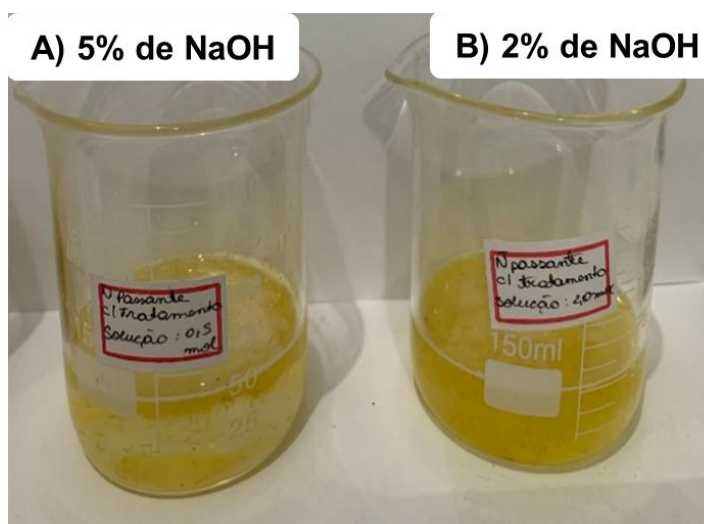
### 3.2.3 Tratamento químico (Alcalino)

Uma fração das fibras selecionadas para este estudo foi submetida ao processo de tratamento alcalino, antes de passarem pelo processo de trituração. Esse tratamento envolveu a exposição das fibras a soluções de hidróxido de sódio (NaOH) em concentrações de 2% e 5% (m/v). A seleção dessas concentrações de NaOH foi embasada em pesquisas prévias realizadas por Oliveira (2018) e Souza (2021), as quais forneceram orientações valiosas sobre os efeitos desejados.

As fibras foram imersas na solução durante um intervalo de 1 hora, sem a aplicação de agitação, mantendo a temperatura ambiente constante durante todo o procedimento. Após a conclusão do tratamento alcalino, as fibras foram submetidas a uma etapa de lavagem utilizando água destilada, visando neutralizar o pH. Em seguida, para a fase de secagem, as fibras foram cuidadosamente dispostas em uma estufa, onde foram submetidas a uma temperatura de 100 °C por um período total de 40 minutos.

A Figura 21 mostra as fibras do bagaço da cana-de-açúcar durante o tratamento com NaOH.

**Figura 21** - Fibras do bagaço da cana-de-açúcar durante tratamento químico.



**Fonte:** Elaborado pela Autora, 2025.

### 3.2.4 Determinação da massa específica

O método empregado para determinar a massa específica aparente das fibras seguiu o protocolo do picnômetro. Inicialmente, foram anotadas as massas do picnômetro vazio ( $m_1$ ) e do picnômetro contendo as fibras ( $m_2$ ), além das massas do picnômetro com fibras e água destilada ( $m_3$ ) e apenas água destilada ( $m_4$ ). Com base nesses registros, a massa específica aparente foi calculada utilizando a Equação 1, onde  $\rho_{H_2O}$  representa a densidade tabelada da água destilada referente à temperatura aplicada durante o experimento.

$$MEA = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 + m_2) - (m_1 + m_3)} * \rho_{H_2O} (g/cm^3) \quad (1)$$

### 3.2.5 Morfologia das fibras

A análise morfológica das fibras do bagaço da cana-de-açúcar, tanto tratadas quanto não tratadas, foi conduzida com o uso de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da TESCAN, modelo Mira3, que possui um canhão de elétrons do tipo FEG (*Field Emission Gun*). Este equipamento conta com um sistema de microanálise por Espectroscopia de Raios-X por Dispersão de Energia (EDS). O objetivo desta análise é entender como a morfologia influencia as propriedades dos compósitos. A observação das fibras no MEV foi realizada de maneira direta, sem a

necessidade de metalização da amostra. O estudo foi conduzido no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LME), que faz parte dos Laboratórios Institucionais do Museu Paraense Emílio Goeldi, localizado no Campus de Pesquisa, no bloco de laboratórios anexo ao Departamento de Ciências da Terra e Ecologia (COCTE). A Figura 22 exibe o microscópio eletrônico de varredura que foi utilizado.

**Figura 22** - Microscópio Eletrônico de Varredura.



**Fonte:** Elaborado pela Autora, 2025.

### 3.2.6 Confeção dos compósitos

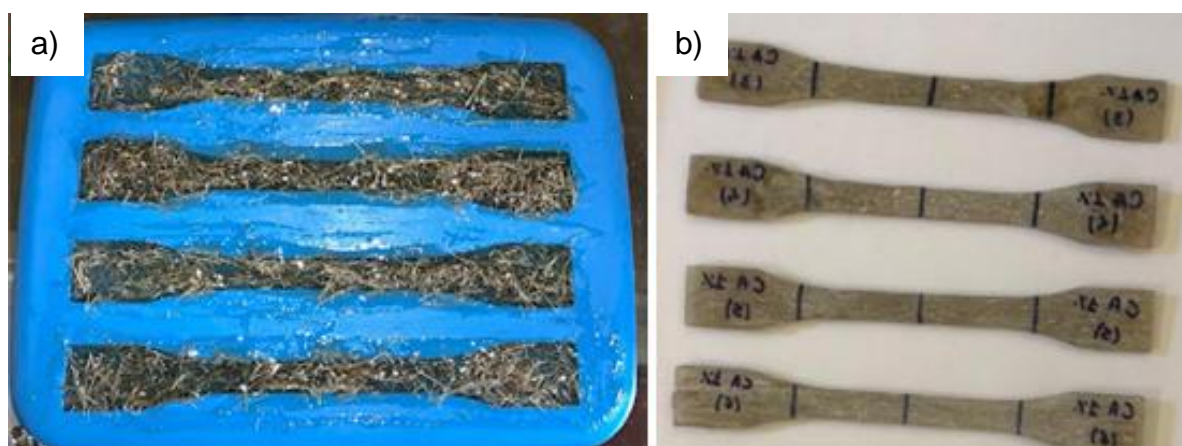
Os compósitos foram confeccionados manualmente nas instalações do Laboratório de Catálise (LABCAT) da Universidade Federal do Pará (UFPA), variando em fibras não tratadas e tratadas com 2% e 5% de Hidróxido de Sódio – NaOH, seguindo proporções de incorporação de 0%, 1%, 2% e 3%. Para esse propósito, foram utilizadas as fibras do bagaço de cana-de-açúcar que foram retidas na peneira de 35 *mesh*.

Antes da produção do compósito, as fibras foram levadas para estufa a 100 °C de temperatura por um período de 10 minutos, com a finalidade de retirar o excesso de umidade. Posteriormente, ocorreu a determinação da massa das fibras do bagaço da cana-de-açúcar de acordo com as respectivas proporções estabelecidas.

A preparação da mistura foi conduzida seguindo a seguinte sequência: primeiro, a resina ortoftálica foi introduzida, seguida do acelerador de cobalto CAT – MET (1,5% v/v), a fibra de bagaço de cana-de-açúcar e, por fim, o iniciador butanox MEK – P (1% v/v). Cada componente foi meticulosamente misturado até alcançar completa homogeneização, antes de ser envasado nos moldes de silicone designados. Tanto os compósitos tratados quanto os não tratados foram fabricados seguindo a mesma metodologia.

O período de cura dos compósitos durou 24 horas, após isto foi feita a remoção dos compósitos dos moldes de silicone, e foram realizados os acabamentos superficiais dos corpos de prova utilizando lixas de granulometria 25 $\mu$ , 50 $\mu$  e 100 $\mu$ , em ordem crescente de granulação, seguindo as normas estabelecidas para os ensaios físicos e de tração. A Figura 23 exibe os materiais compósitos vertidos no molde de silicone a), os corpos de prova fabricados que seguiram as recomendações da norma ASTM D 638 para ensaios de tração b).

**Figura 23** - a) Corpos de prova no molde; b) Corpos de prova prontos para ensaio de tração.



**Fonte:** Elaborado pela Autora, 2025.

Os compósitos fabricados com as fibras sem tratamento alcalino foram identificados como (FBCA), já os compósitos fabricados com tratamento alcalino com 2% de NaOH foram identificados como (FBCAT2) e os compósitos fabricados com tratamento alcalino com 5% de NaOH foram identificados como (FBCAT5).

A Tabela 3 mostra a nomenclatura utilizada em cada compósito de forma detalhada.

Tabela 3 - Nomenclatura dos compósitos fabricados.

Nomenclatura	Descrição
MP	Matriz Plena
FBCA - 1%	Fibras de Cana-de-Açúcar Sem Tratamento com 1% de Fibras
FBCA - 2%	Fibras de Cana-de-Açúcar Sem Tratamento com 2% de Fibras
FBCA - 3%	Fibras de Cana-de-Açúcar Sem Tratamento com 3% de Fibras
FBCAT2 - 1%	Fibras de Cana-de-Açúcar Tratadas com 2% de NaOH com 1% de Fibras
FBCAT2 - 2%	Fibras de Cana-de-Açúcar Tratadas com 2% de NaOH com 2% de Fibras
FBCAT2 - 3%	Fibras de Cana-de-Açúcar Tratadas com 2% de NaOH com 3% de Fibras
FBCAT5 - 1%	Fibras de Cana-de-Açúcar Tratadas com 5% de NaOH com 1% de Fibras
FBCAT5 - 2%	Fibras de Cana-de-Açúcar Tratadas com 5% de NaOH com 2% de Fibras
FBCAT5 - 3%	Fibras de Cana-de-Açúcar Tratadas com 5% de NaOH com 3% de Fibras

**Fonte:** Elaborado pela Autora, 2025.

### 3.2.7 Caracterização dos compósitos

#### 3.2.7.1 Ensaios físicos

Os ensaios físicos de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e massa específica aparente (MEA) foram conduzidos de acordo com as normas ASTM D 570, ASTM D 2734 e ASTM D 792, respectivamente. Estas análises foram realizadas nas instalações do Laboratório de Materiais Porosos Sintetizados (LAMPS) da Universidade Federal do Pará.

Para a determinação da massa seca ( $M_s$ ), os corpos de prova foram colocados em uma estufa e mantidos a 105 °C por um período de 24 h. Já para a massa úmida ( $M_u$ ), os corpos de prova foram imersos em um recipiente com água e mantidos por 24h. A massa imersa ( $M_i$ ) foi determinada utilizando-se um aparato para medir a massa do corpo de prova imerso em água.

Os corpos de prova foram submetidos à pesagem utilizando uma balança analítica para a obtenção das massas secas ( $M_s$ ) e úmidas ( $M_u$ ). Para a massa imersa foi utilizado um aparato especial. Além disso, para cada proporção dos compósitos, foram utilizados cinco corpos de prova para maior precisão dos resultados dos ensaios físicos.

A massa específica aparente (MEA), porosidade aparente (PA) e absorção de água (AA) foram obtidas através das Equações 2, 3 e 4.

$$AA = \frac{M_U - M_S}{M_S} \cdot 100 (\%) \quad (2)$$

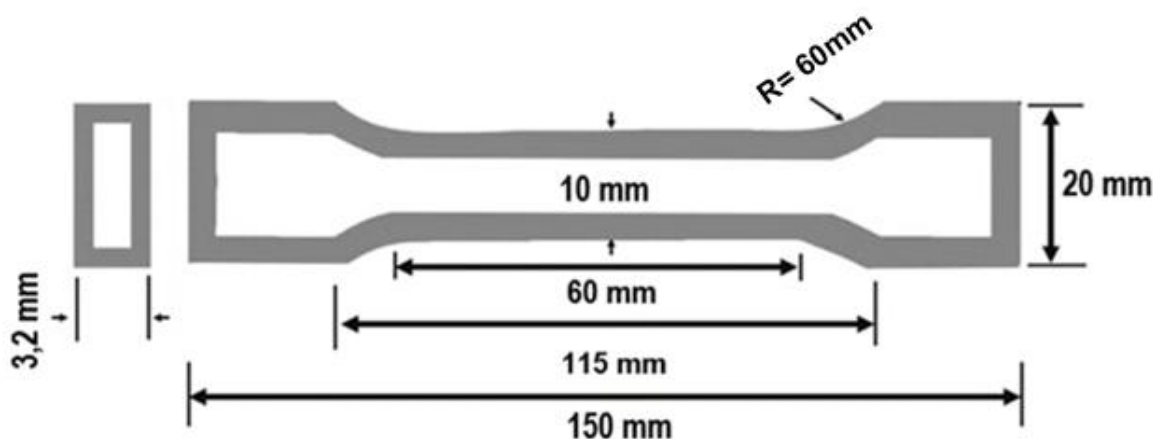
$$PA = \frac{M_U - M_S}{M_U - M_I} \cdot 100(\%) \quad (3)$$

$$MEA = \frac{M_S}{M_U - M_I} \cdot \rho_{H_2O} (g/cm^3) \quad (4)$$

### 3.2.7.2 Ensaio mecânico de tração

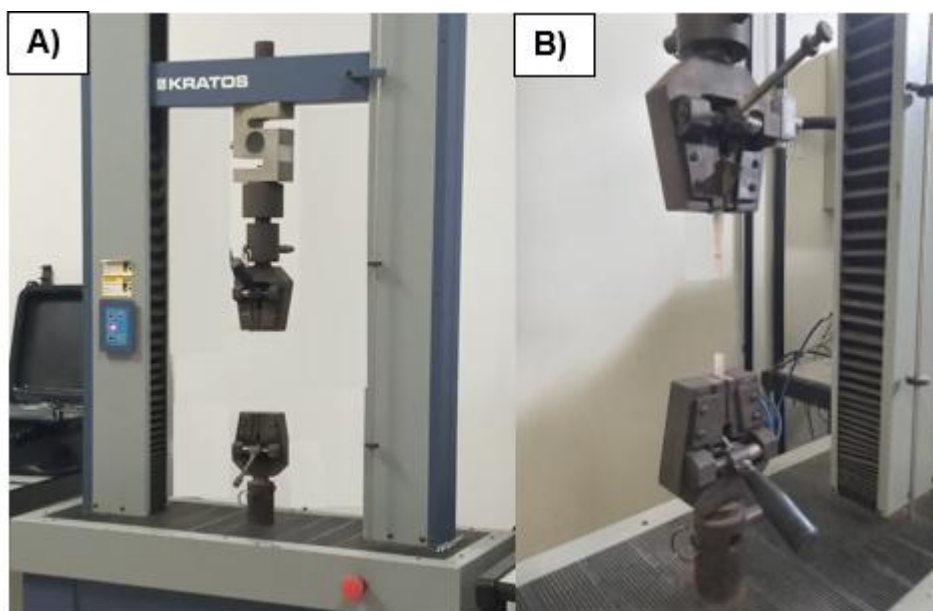
O ensaio de tração ocorreu no laboratório de engenharia mecânica da Universidade Federal do Pará e seguiu a norma ASTM D 638, neste ensaio foram utilizados 8 corpos de prova para cada série produzida. O ensaio foi realizado com o auxílio da máquina de marca KRATOS, modelo KE 2000 MP. equipado com uma célula de carga de 5 kN. A velocidade de ensaio adotada foi de 5 mm/min. Para este ensaio foram utilizados 8 corpos de prova para cada série fabricada. A Figura 24 mostra as dimensões do corpo de prova utilizado para este ensaio. Já a Figura 25 exibe a máquina Kratos utilizada neste ensaio.

**Figura 24** - Dimensões do corpo de prova.



Fonte: Adaptado de ASTM D 638, 2014.

**Figura 25** - a) Máquina utilizada no ensaio de tração, b) Corpo de prova rompido após o ensaio.



**Fonte:** Elaborado pela Autora, 2025.

### 3.2.8 Análise estatística

Os resultados obtidos nos ensaios físicos (AA, PA E MEA) e mecânico (tração) foram submetidos à análise estatística (ANOVA e Teste Tukey) de fator único através do software Past 4.03, com confiabilidade de 95%. Utilizou-se o teste F para realizar a análise, com o nível de significância de 5% para todos os testes. O objetivo desta análise foi verificar se os resultados das médias das caracterizações físicas e mecânicas se diferem entre si de maneira significativa em diferentes composições.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Determinação dos sólidos solúveis totais

A determinação dos sólidos solúveis totais do bagaço da cana-de-açúcar foi realizada por meio do refratômetro digital e pHmetro. O objetivo principal foi determinar quando o bagaço estaria livre de sacarose e impurezas.

A Tabela 4 exibe os resultados da análise do °Brix e do valor de pH durante o período de imersão do bagaço de cana-de-açúcar em água destilada. Observa-se uma redução significativa no °Brix após 5 minutos de lavagem para remoção de detritos. Após 48 horas de imersão, o valor do °Brix atinge 0, indicando a ausência de sólidos solúveis na solução. Este resultado sugere que o processo de lavagem e imersão foi eficaz na remoção dos sólidos solúveis presentes no bagaço de cana, que são principalmente impurezas e sacarose.

Tabela 4 - Resultado das análises do °BRIX e pH.

Amostras	°BRIX	pH
Caldo da cana	16,3	6,0
Após 5 min	0,2	6,16
24h imerso	0,1	4,52
48h imerso	0	4,05
72h imerso	0	4,16

Fonte: Elaborado pela Autora, 2025.

Além disso, os resultados da Tabela 4, apresentam uma diminuição gradual do pH ao longo do período de imersão do bagaço de cana-de-açúcar em água destilada. Essa diminuição pode ser explicada pela liberação de ácidos orgânicos presentes na estrutura do bagaço que são solúveis em água e contribuem para a acidificação do meio (Embrapa, 2021).

Após 72 horas, observa-se um ligeiro aumento no valor do pH, conforme destacado por Castro (2008), durante a fermentação, o pH da cana geralmente diminui inicialmente devido à produção de ácidos orgânicos, como o ácido láctico, por parte das leveduras e bactérias. No entanto, conforme a fermentação avança e o álcool é produzido, e o pH pode subir novamente.

## 4.2. Determinação da massa específica

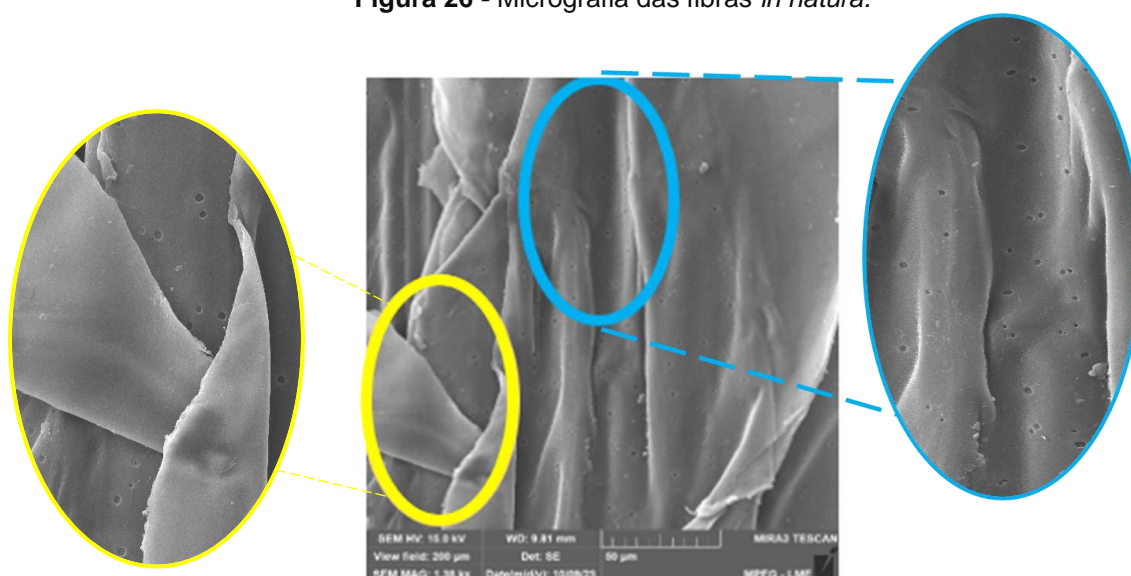
Utilizando a Equação 1, procedeu-se ao cálculo da densidade da fibra proveniente do bagaço de cana-de-açúcar, resultando em um valor de  $0,658 \text{ g/cm}^3$ . Este resultado mostrou-se próximo ao valor mencionado por Shojaeiarani, Bajwa e Bajwa (2019), que relataram uma densidade do bagaço de cana-de-açúcar de  $0,635 \text{ g/cm}^3$ . A concordância entre esses valores evidencia a precisão do método empregado para a determinação da massa específica da fibra do bagaço de cana-de-açúcar.

No caso da massa específica da fibra tratada, obteve-se um valor de  $0,919 \text{ g/cm}^3$ , que se assemelha ao resultado obtido por Dori (2022), o qual indicou uma massa de  $0,839 \text{ g/cm}^3$ . Essa concordância reforça a confiabilidade do método utilizado na determinação da densidade da fibra tratada do bagaço de cana-de-açúcar.

## 4.3. Morfologia das fibras

A análise morfológica das fibras do bagaço de cana-de-açúcar, sem tratamento alcalino e tratadas com NaOH a 2% e 5%. Na Figura 26 pode-se observar a micrografia das fibras do bagaço de cana-de-açúcar sem tratamento alcalino.

Figura 26 - Micrografia das fibras *in natura*.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2025.

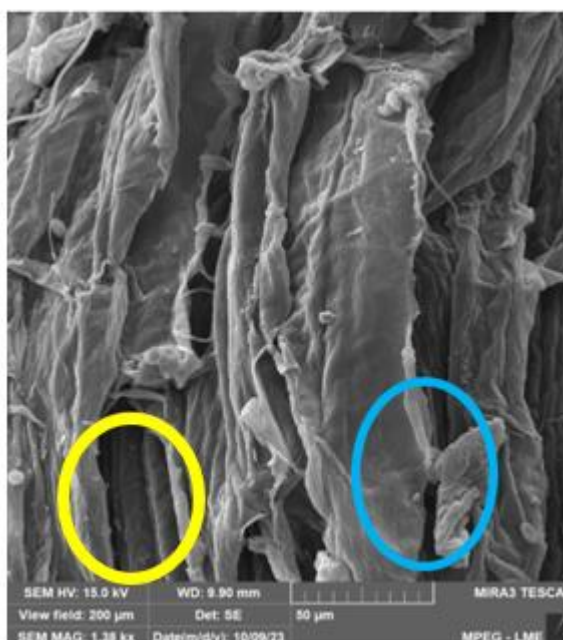
Na Figura 26, observa-se um número considerável de poros (círculo azul), além de uma camada superficial lisa, possivelmente composta por cera (círculo amarelo).

Oliveira (2018), também observou em seu estudo a presença de poros na microestrutura do bagaço de cana-de-açúcar, o autor comenta que os poros estão presentes na maioria das fibras naturais lignocelulósicas e são responsáveis pela manutenção da planta onde transportam água e nutrientes ao longo das várias células até as raízes e folhas e para o seu crescimento.

Florindo (2017), explica que a camada lisa superficial pode ser associada a ceras e extrativos, além de constituintes como lignina e hemicelulose. Mzimela *et al.*, (2018), comenta que as fibras do bagaço de cana-de-açúcar apresentam muitos materiais não fibrosos, desde ceras e pectina, que estão espalhados pela superfície e que a presença desta cera faz com haja uma interação ineficaz entre a fibra e a matriz.

A Figura 27 exhibe a micrografia da fibra do bagaço de cana-de-açúcar submetida ao tratamento alcalino com 2% de NaOH.

**Figura 27** - Micrografia da fibra tratada com 2% de NaOH.



**Fonte:** Elaborado pela Autora, 2025.

Na micrografia da fibra do bagaço de cana-de-açúcar, observa-se ainda a presença de uma camada cerosa na superfície da fibra (círculo azul). Além disso, identificam-se pontos nos quais se nota a presença de feixes de fibras alinhadas

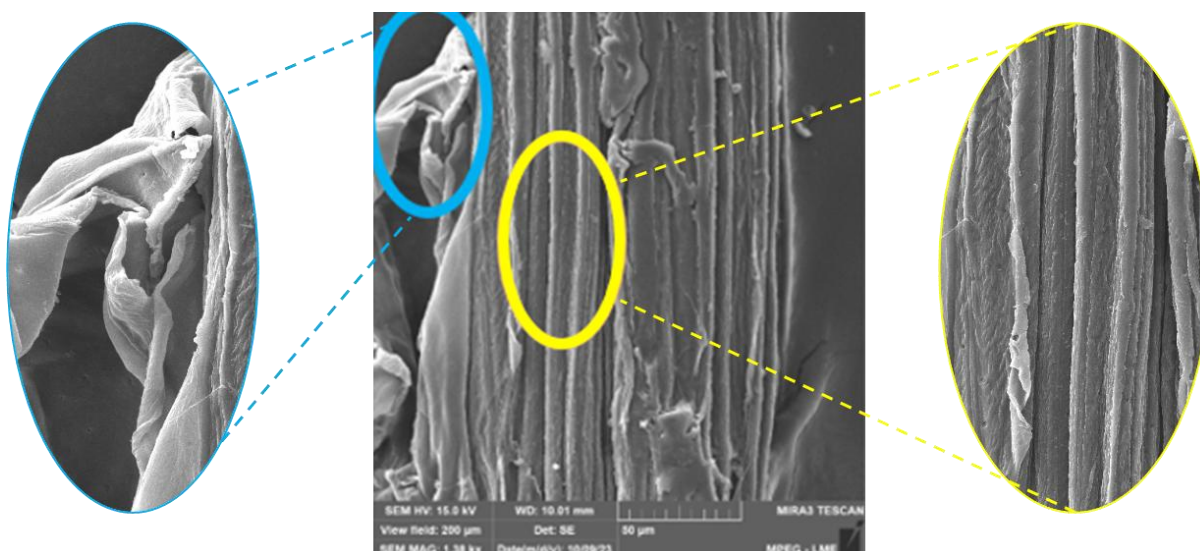
verticalmente (círculo amarelo), o que indica que o tratamento alcalino com 2% de NaOH atuou para remover parte do material ceroso presente na superfície da fibra.

Conforme Mzimela *et al.*, (2018), as superfícies de materiais celulósicos submetidos a tratamento químico tendem a ser mais limpas e ligeiramente mais ásperas em comparação com as do bagaço cru. Isso é interpretado como um sinal da remoção de hemiceluloses, lignina, pectinas e ceras.

Oliveira (2018), comenta que as fibras naturais, quando submetidas a um tratamento químico, tendem a se desagregar e formar fibrilas alinhadas. Este fenômeno, chamado de fibrilação, envolve a dissolução da hemicelulose e a fragmentação das fibras em partes menores. Como resultado, a área de superfície efetiva aumenta, melhorando a interação com a matriz e otimizando a região de interface.

A Figura 28 mostra a micrografia da fibra do bagaço de cana-de-açúcar submetida ao tratamento alcalino com 5% de NaOH.

**Figura 28** - Micrografia da fibra tratada com 5% de NaOH.



**Fonte:** Elaborado pela Autora, 2025.

A micrografia da fibra do bagaço de cana-de-açúcar, tratada com 5% de NaOH, evidencia que houve mudanças microestruturais físicas na superfície da fibra que demonstra uma quantidade reduzida de cera (círculo azul) em comparação com as Figuras 27 e 28. Além disso, nota-se a presença de rugosidade e fibrilas alinhadas verticalmente (círculo amarelo).

Florindo (2017), destaca que com o tratamento alcalino, observa-se uma maior adesão das fibras, com uma superfície rugosa devido a remoção da lignina. Segundo Zainal *et al.*, (2019), O tratamento alcalino resulta em um aumento significativo na rugosidade superficial da fibra e o aparecimento de fibras de diâmetros reduzidos, possivelmente como resultado da eliminação de hemiceluloses e lignina. Essa superfície rugosa favorece tanto o entrelaçamento mecânico quanto a reação de ligação, devido à exposição dos grupos hidroxila à matriz, o que potencializa a aderência entre a fibra e a matriz.

#### 4.4. Ensaios físicos

Na Tabela 5 estão dispostos os resultados dos ensaios físicos realizados em compósitos de bagaço de cana-de-açúcar, tanto sem tratamento (FBCA) quanto tratados com 2% (FBCAT2) e 5% (FBCAT5) de NaOH. A proporção mássica variou entre 1%, 2% e 3% de fibras. Os ensaios físicos incluem a Massa Específica Aparente (MEA), a Porosidade Aparente (PA) e a Absorção de Água (AA).

Tabela 5 - Resultado dos ensaios físicos.

Fibra/ Proporção	Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade Aparente (%)	Absorção de Água (%)
MP	1,176 ± 0,015	1,376 ± 0,507	1,176 ± 0,437
FBCA - 1%	1,161 ± 0,019	1,099 ± 0,711	0,949 ± 0,638
FBCA - 2%	1,162 ± 0,009	1,807 ± 0,316	1,554 ± 0,286
FBCA - 3%	1,154 ± 0,016	1,931 ± 0,701	1,656 ± 0,625
FBCAT2 - 1%	1,177 ± 0,016	0,752 ± 0,967	0,623 ± 0,829
FBCAT2 - 2%	1,178 ± 0,006	1,049 ± 0,543	0,890 ± 0,465
FBCAT2 - 3%	1,165 ± 0,027	1,626 ± 0,893	1,408 ± 0,816
FBCAT5 - 1%	1,178 ± 0,011	1,471 ± 0,750	1,271 ± 0,642
FBCAT5 - 2%	1,188 ± 0,017	0,353 ± 0,660	0,291 ± 0,557
FBCAT5 - 3%	1,173 ± 0,014	1,208 ± 0,406	1,015 ± 0,351

Fonte: Elaborado pela Autora, 2025.

De acordo com a Tabela 5, a Massa Específica Aparente (MEA) parece diminuir ligeiramente à medida que a proporção de fibras de bagaço de cana-de-açúcar aumenta de 1% para 3%, nos compósitos sem tratamento (FBCA) em relação à Matriz Plena (MP). Os compósitos tratados com 2% e 5% de NaOH (FBCAT2 e FBCAT5) e

em relação à Matriz Plena (MP) com 3% de fibras, têm uma MEA menor que a MP. A série FBCAT5, com 2% de fibras, apresentou a MEA mais alta (1,188 g/cm<sup>3</sup>). De acordo com Borges, Motta e Pinto (2019), se os valores da MEA forem menores que os da MP, isso pode sugerir que a adição de fibras torna o compósito ligeiramente menos denso o que pode ser vantajoso em termos de economia de materiais e processos industriais.

Com o objetivo de avaliar a influência das diferentes concentrações do tratamento alcalino sobre a massa específica aparente dos compósitos, a ANOVA resultou em um valor de F igual a 3,52, com um valor p de 0,00273, indicando que existem diferenças estatisticamente significativas entre pelo menos dois dos grupos analisados ( $p < 0,05$ ). Esses resultados permitem rejeitar a hipótese nula de igualdade entre as médias, revelando que a concentração do tratamento alcalino aplicado às fibras afeta significativamente a massa específica aparente do compósito.

Para identificar quais grupos apresentaram essas diferenças, foi aplicado o teste de comparações múltiplas de Tukey. Os pares que apresentaram diferenças estatisticamente significativas foram: FBCA 1% em comparação com FBCAT5-2% ( $p = 0,0208$ ), FBCA 3% em comparação com FBCAT5-2% ( $p = 0,0083$ ) e FBCAT2-3% em comparação com FBCAT5-2% ( $p = 0,0239$ ). Esses resultados apontam que o grupo FBCAT5-2% apresentou comportamento significativamente distinto em relação aos demais, sugerindo que esse tratamento específico promove alterações relevantes na densidade do compósito. Os demais pares não apresentaram diferenças estatisticamente significativas, indicando similaridade entre os grupos nesses casos. Dessa forma, os resultados mostram que a massa específica aparente é influenciada pela natureza e concentração do tratamento alcalino, sendo o grupo FBCAT5-2% o que mais se destacou estatisticamente.

Já a Porosidade Aparente (PA) parece aumentar com o aumento da proporção de fibras para o FBCA e FBCAT2. No entanto, para o FBCAT5, a PA oscila com a proporção de fibras. A PA da maioria dos compósitos é maior do que para a MP, o que indica que a adição de fibras de bagaço de cana-de-açúcar aumenta a porosidade do material. A série FBCAT5 com 2% de fibra apresenta a menor PA (0,353%).

De acordo com Carmello (2021), este resultado sugere que o tratamento com 5% de NaOH pode ter resultado em uma melhor adesão entre as fibras e a matriz, levando a uma menor formação de vazios e uma maior homogeneidade dos compósitos. Isso ocorre porque a porosidade aparente em compósitos pode indicar a

qualidade da adesão entre a fibra e a matriz. Quando a adesão é boa, menos espaços vazios ou "poros" são formados na interface entre a fibra e a matriz. Isso ocorre porque as fibras estão bem incorporadas na matriz, resultando em uma estrutura mais densa e homogênea.

A fim de avaliar a influência dos diferentes tratamentos alcalinos na porosidade aparente dos materiais estudados, a ANOVA revelou diferenças estatisticamente significativas entre os grupos ( $F(9,40) = 3,73$ ,  $p = 0,00178$ ). Como o valor de  $p$  é inferior a 0,05, rejeita-se a hipótese nula de que todas as médias são iguais, indicando que ao menos um dos tratamentos resultou em alteração significativa na porosidade aparente em comparação aos demais. Para identificar quais grupos apresentaram essas diferenças, foi aplicado o teste de comparações múltiplas de Tukey. Os resultados indicaram que o grupo FBCAT5-2% apresentou diferenças estatisticamente significativas em relação aos grupos FBCA 2%, FBCA 3% e FBCAT2-3%, com valores de  $p$  inferiores a 0,05. Essas diferenças sugerem que esse tratamento alcalino específico (FBCAT5 com 2% de inserção de fibra) possui um efeito distinto sobre a porosidade aparente, sendo provavelmente responsável pela variabilidade detectada na ANOVA.

Dessa forma, os resultados indicam que tanto o tipo quanto a concentração do tratamento alcalino exercem influência significativa na porosidade aparente dos materiais. Em particular, o grupo FBCAT5-2% se destaca por apresentar comportamento estatisticamente distinto em comparação a outros tratamentos, o que pode ter implicações importantes para a modificação da estrutura física do material analisado.

A Absorção de Água (AA) também mostra um padrão semelhante ao da PA. A AA da maioria dos compósitos é menor do que para a MP, sugerindo que a adição de fibras de bagaço de cana-de-açúcar reduz a absorção de água do material. A série FBCAT5 com 2% de fibras apresenta a menor AA (0,291%).

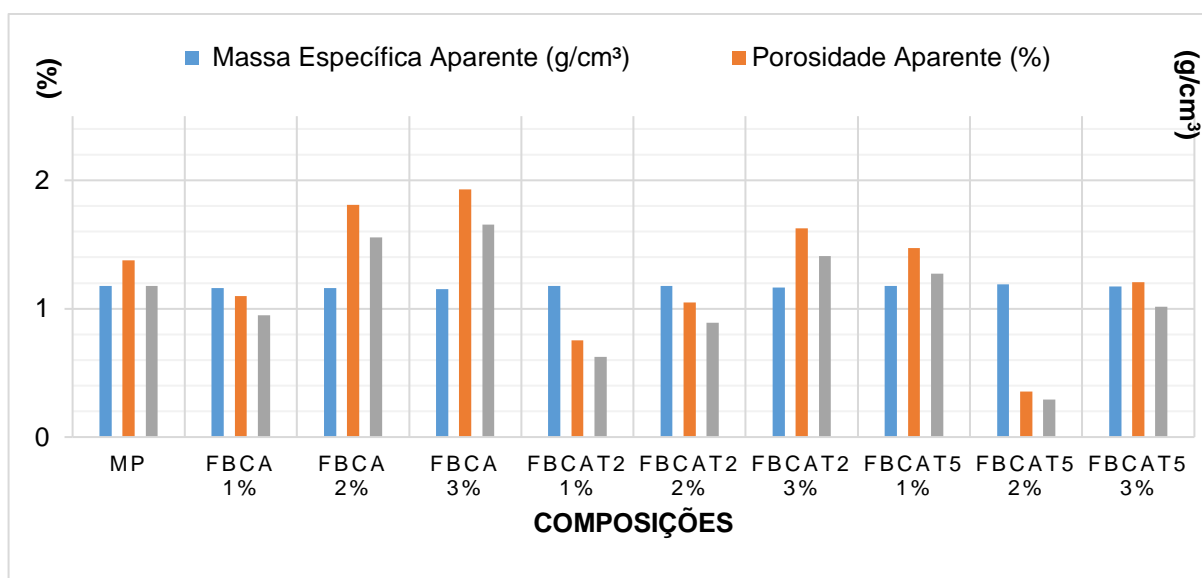
Os compósitos FBCAT2 com 1% e FBCAT5 com 2% são aqueles que apresentaram os menores valores de AA. Isso pode estar relacionado ao tratamento químico com NaOH realizado nessas séries, pois esse tratamento tem a capacidade de reduzir a característica hidrofílica das fibras, gerando uma maior afinidade com matrizes hidrofóbicas, além da habilidade de alterar a cristalinidade da fibra por meio da remoção de lignina e hemicelulose (Souza, 2021).

Para análise estatística do ensaio físico de absorção de água, utilizou-se a ANOVA, indicou que há diferenças significativas entre os grupos analisados ( $F(9,40) = 3,73$ ;  $p = 0,00177$ ). O valor de  $p$  inferior a 0,05 permite rejeitar a hipótese nula de que todas as médias são iguais, indicando que ao menos um dos grupos difere estatisticamente dos demais no que diz respeito à absorção de água.

Para identificar especificamente quais grupos apresentaram diferenças significativas, foi realizado o teste Tukey. Os resultados revelaram que o grupo FBCAT5 - 2% apresentaram valores significativamente inferiores de absorção de água quando comparado com os grupos FBCA 2% ( $p = 0,0132$ ), FBCA 3% ( $p = 0,0030$ ) e FBCAT2-3% ( $p = 0,0037$ ). Todas as demais comparações entre os grupos não apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Estes resultados sugerem que a série FBCAT5-2% resultou em um desempenho estatisticamente inferior no que diz respeito à absorção de água. Os demais grupos apresentaram desempenhos semelhantes entre si, não sendo possível afirmar superioridade estatística em relação à MP ou aos demais tratamentos.

A Figura 29 exibe um gráfico comparativo dos resultados de Massa Específica Aparente, Porosidade Aparente e Absorção de Água entre os compósitos produzidos com a Matriz Plena (MP).

**Figura 29** - Resultado dos ensaios físicos.



**Fonte:** Elaborado pela Autora, 2025.

Na Figura 29, observa-se que a Massa Específica Aparente (MEA) de todos os compósitos fabricados tanto tratados quanto não tratados com a inserção de 3% de fibras, apresenta a menor MEA em comparação à MP. Este resultado aponta para um desempenho positivo dos compósitos. Conforme mencionado por Santos Junior (2017), no setor industrial atual, a leveza dos materiais é um fator crucial. Isso não só resulta em economia na produção, mas também requer menos resina, um componente de alto custo, na fabricação desses compósitos.

Pode-se observar que os compósitos tratados (FBCAT2 - 1%) e (FBCAT5 - 2%) apresentaram menor Porosidade Aparente (PA) e Absorção de Água (AA) em relação a MP. Este resultado possivelmente está associado com fato de que o tratamento químico de mercerização pode promover alterações na estrutura das fibras como o aumento das ligações de OH na superfície das fibras, reduzindo a capacidade de absorção de água devido à diminuição da eficiência na penetração da água. Além disso, esse tratamento pode desfibrilar as fibras, ampliando a área de contato com a matriz, resultando em uma distribuição mais homogênea das fibras e reduzindo a porosidade aparente do compósito. O tratamento alcalino pode também extrair componentes menos estáveis, como as ceras, levando à remoção parcial de hemicelulose e lignina, resultando em fibras mais estáveis e com menor capacidade de absorção de água (Souza, 2021; Santos, 2023).

#### **4.5. Ensaio mecânico de tração**

A Tabela 6 contém os resultados dos ensaios mecânicos de tração realizados nos compósitos do bagaço de cana-de-açúcar, tanto sem tratamento alcalino (FBCA) quanto tratados com 2% (FBCAT2) e 5% (FBCAT5) de NaOH. A proporção mássica variou entre 1%, 2% e 3% de fibras. No ensaio mecânico de tração foram observados o Limite de Resistência a Tração (LRT), Alongamento e Modulo de Elasticidade (ME).

Tabela 6 - Resultado dos ensaios mecânicos de tração.

Resíduo/ Proporção	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
MP	43,973 ± 4,697	7,111 ± 1,181	0,511 ± 0,035
FBCA - 1%	24,386 ± 2,071	3,280 ± 0,805	0,856 ± 0,356
FBCA - 2%	26,246 ± 3,091	3,665 ± 0,466	0,663 ± 0,239
FBCA - 3%	22,000 ± 2,630	3,831 ± 1,577	0,677 ± 0,306
FBCAT2 - 1%	23,138 ± 2,795	5,038 ± 0,525	0,311 ± 0,051
FBCAT2 - 2%	19,648 ± 1,584	3,504 ± 0,655	0,378 ± 0,093
FBCAT2 - 3%	17,650 ± 1,301	4,620 ± 0,908	0,254 ± 0,067
FBCAT5 - 1%	17,246 ± 4,300	3,949 ± 0,600	0,385 ± 0,266
FBCAT5 - 2%	16,156 ± 2,181	4,148 ± 0,537	0,266 ± 0,099
FBCAT5 - 3%	16,162 ± 2,480	4,480 ± 1,008	0,247 ± 0,058

Fonte: Elaborado pela Autora, 2025.

De acordo com os dados da Tabela 6, é possível observar que nenhum compósito fabricado superou o Limite de Resistência à Tração (LRT) da Matriz Plena (MP), que foi de 43,973 MPa, indicando que os compósitos possuem menor resistência à tração do que a MP.

Ao comparar os compósitos fabricados, o que apresentou o valor mais alto foi o compósito sem tratamento alcalino com 2% de fibras (FBCA - 2%), que registrou 26,246 MPa. Este resultado do compósito sem tratamento alcalino supera o encontrado na literatura pesquisada. Lopes *et al.* (2019) obtiveram uma média de 20 MPa utilizando a mesma fibra.

Entre as fibras tratadas com NaOH, tanto com 2% quanto com 5%, nenhuma superou o LRT das fibras sem tratamento alcalino. O melhor resultado da série das fibras tratadas com 2% de NaOH foi da série (FBCAT2 – 1%), que apresentou 23,138 MPa. Este resultado se aproxima do encontrado por Santos (2023), que utilizou fibras de bagaço de cana-de-açúcar de 15 mm tratadas com 2% de NaOH, obtendo 24,770 MPa de LRT com a inserção de 1% de fibras.

O LRT mais alto das fibras tratadas com 5% de NaOH foi apresentado pela série (FBCAT5 - 1%), com o maior valor da série sendo de 17,246 MPa. Esses resultados foram inferiores aos encontrados na literatura pesquisada. Souza (2021) fabricou compósitos de polipropileno reforçados com bagaço de cana-de-açúcar e tratou com 5% de NaOH, obtendo um valor de 23,08 de LRT.

Beltrami *et al.* (2014), afirmam que o tratamento com NaOH pode aprimorar diversas propriedades dos compósitos, como a adesão entre as fibras e a matriz; no entanto, não necessariamente resulta no aumento da resistência à tração. A resistência à tração de um compósito é influenciada por vários fatores, tais como o tipo de fibra, a matriz utilizada, a qualidade da interface entre fibra e matriz, e o processo de fabricação do compósito.

Lazarini (2021) conduziu a fabricação de compósitos utilizando fibras de bagaço de cana-de-açúcar tratadas com concentrações de NaOH de 1%, 2%, 4% e 8%. Os resultados indicam que o tratamento alcalino não produziu efeitos significativos nas propriedades mecânicas dos compósitos fabricados. Isso sugere que o tratamento das fibras foi responsável por colapsar o lúmen, contraindo as fibras, sem, contudo, resultar em efeito positivo na adesão interfacial.

Com o intuito de verificar a existência de diferenças estatísticas no Limite de Resistência à Tração (LRT) entre os grupos analisados, foi realizada uma análise de variância (ANOVA). O teste indicou um valor de F de 33,94897, superior ao valor crítico de 2,1240, com um valor P de  $5,52 \times 10^{-16}$ , confirmando que há diferenças estatisticamente significativas entre os grupos ao nível de 5% ( $\alpha = 0,05$ ).

Diante disso, procedeu-se com o teste de comparações múltiplas de Tukey para identificar entre quais tratamentos essas diferenças ocorrem. Os resultados revelaram que o grupo controle (MP) apresentou valores significativamente superiores de LRT em comparação a todos os demais tratamentos, indicando que a aplicação dos tratamentos químicos comprometeu a resistência do material. Além disso, também foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre alguns tratamentos com aplicação de tratamentos químicos. Por exemplo, as séries FBCA 1% e FBCAT2-3%, FBCA 2% e FBCAT2-3%, bem como FBCAT2-1% em comparação com FBCAT2-3%, FBCAT5-1%, FBCAT5-2% e FBCAT5-3%, apresentaram diferenças significativas, sugerindo que a formulação e a concentração dos tratamentos químicos influenciam diretamente no desempenho mecânico. Esses resultados reforçam que, de modo geral, a aplicação de tratamentos químicos reduziu o LRT em relação à matéria-prima original e que a combinação do tipo e da concentração desses tratamentos pode afetar significativamente as propriedades do material.

Todos os compósitos fabricados apresentaram um alongamento menor do que o da MP. Isso sugere que eles podem ser menos flexíveis, ou seja, deformam menos antes de romper em comparação com a MP.

Com o objetivo de identificar diferenças estatísticas entre os grupos analisados quanto ao alongamento, foi realizada o teste ANOVA, cujo valor de F (7,6226) superou o valor crítico (2,1240), com valor P de  $2,08 \times 10^{-6}$ , indicando diferença estatisticamente significativa entre pelo menos dois grupos ( $\alpha = 0,05$ ).

Para identificar quais tratamentos diferiram entre si, aplicou-se o teste de comparações múltiplas de Tukey. Os resultados mostraram que o grupo controle (MP) apresentou valores significativamente superiores de alongamento em comparação com todos os demais tratamentos contendo NaOH, evidenciando que a adição desses componentes reduziu o desempenho do material. Também foram observadas diferenças significativas entre alguns grupos tratados, como entre FBCA 1% e FBCAT2-1%, e entre FBCA 3% e FBCAT2-1%, indicando que a utilização do tratamento alcalino pode influenciar no comportamento do material. As demais comparações entre tratamentos com NaOH não apresentaram diferenças significativas, sugerindo que, dentro de um mesmo tipo de tratamento, a variação de concentração não impactou substancialmente o alongamento.

Os compósitos fabricados sem tratamento alcalino apresentaram um valor do módulo de elasticidade (ME) maior do que o da MP. Por outro lado, os compósitos tratados, independentemente da porcentagem do tratamento utilizado, demonstraram um valor de ME menor que o da MP. Isso indica que resistem mais à deformação sob carga. No entanto, a maioria dos compósitos tratados têm um alongamento maior que os compósitos sem tratamento, o que significa que deformam mais antes de quebrar, sendo, portanto, mais flexíveis.

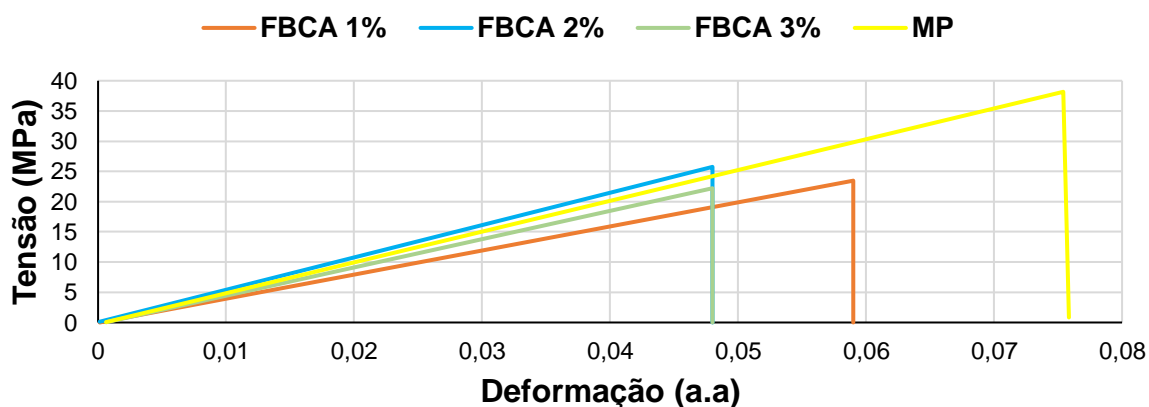
Com o intuito de identificar quais grupos apresentaram diferenças estatisticamente significativas na variável analisada, foi realizado o teste de comparações múltiplas de Tukey com nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). Os resultados revelaram que a série MP apresentou diferença estatística significativa em relação a série não tratada com 1% de inserção de fibras, evidenciando que este tratamento reduziu significativamente os valores observados. Além disso, foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre as séries FBCA 3% e FBCAT2-3%, bem como entre FBCA 3% e FBCAT5-1%, sugerindo que a concentração dos tratamentos químicos influencia diretamente o desempenho da

propriedade avaliada. O mesmo padrão foi observado na comparação entre FBCA 1% e FBCAT2-3%, reforçando que, dentro dos grupos com tratamentos, a variação na concentração química pode impactar os resultados.

Por outro lado, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre alguns grupos, como FBCAT5-2% e FBCAT5-3%, o que indica que a variação da concentração dentro de um mesmo tipo de tratamento químico nem sempre resulta em alteração significativa da propriedade avaliada. Esses resultados demonstram que a aplicação do tratamento químico, bem como suas variações de concentração, exerce influência significativa sobre os resultados, sendo algumas concentrações mais eficazes do que outras na modificação da propriedade em estudo.

A Figura 30 exibe um gráfico de Tensão x Deformação que compara os resultados do ensaio mecânico de tração dos compósitos fabricados sem tratamento alcalino com a matriz plena.

**Figura 30** - Gráfico de Tensão x Deformação da matriz plena (MP) com os compósitos não tratados.

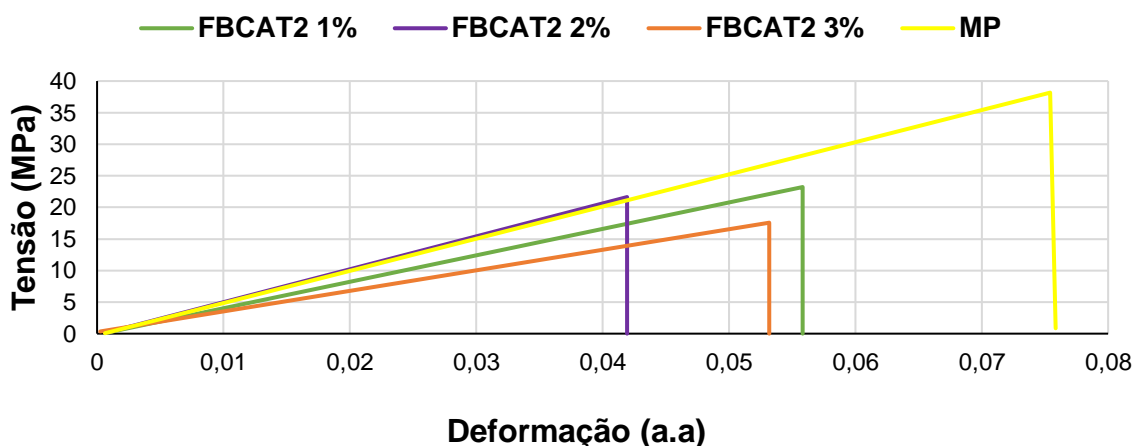


**Fonte:** Elaborado pela Autora, 2025.

Na Figura 30 é possível observar que os compósitos de fibra do bagaço de cana-de-açúcar sem tratamento não superaram o limite de resistência a tração da MP. Dentre os compósitos sem tratamento o que mais se aproximou da MP foi o FBCA com 2% de fibras que teve LRT de 26,246 MPa. Nota-se que, dentre os compósitos fabricados, o FBCA 2% destaca-se como o mais resistente em relação à tensão.

A Figura 31 mostra um gráfico de Tensão x Deformação que compara os resultados do ensaio mecânico de tração dos compósitos fabricados tratados com 2% de NaOH em relação a matriz plena.

**Figura 31** - Gráfico de Tensão x Deformação da matriz plena (MP) com os compósitos tratados com 2% de NaOH.

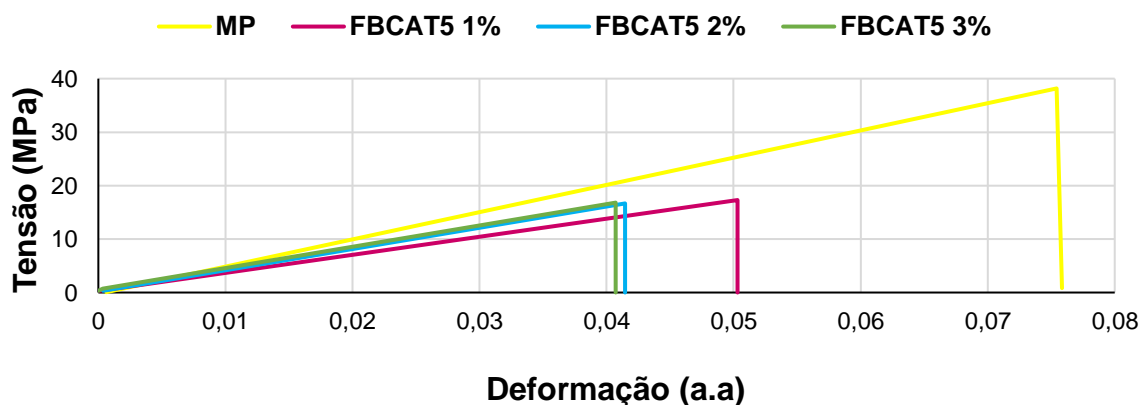


Fonte: Elaborado pela Autora, 2025.

Entre as séries tratadas, destaca-se que os compósitos que apresentaram os maiores limites de LRT foram aqueles tratados com 2% de NaOH. A série que mais se aproxima do LRT da MP é a FBCAT2 1%, registrando 23,138 MPa. No entanto, é importante observar que, apesar dessa resistência, o valor de alongamento desse compósito é inferior ao da MP, evidenciando sua menor flexibilidade. Esse baixo valor de alongamento é indicativo da capacidade do material de se deformar antes da ruptura.

A Figura 32 ilustra um gráfico de Tensão x Deformação que compara os resultados do ensaio mecânico de tração dos compósitos fabricados tratados com 5% de NaOH em relação a matriz plena.

**Figura 32** - Gráfico de Tensão x Deformação da matriz plena (MP) com os compósitos tratados com 5% de NaOH.

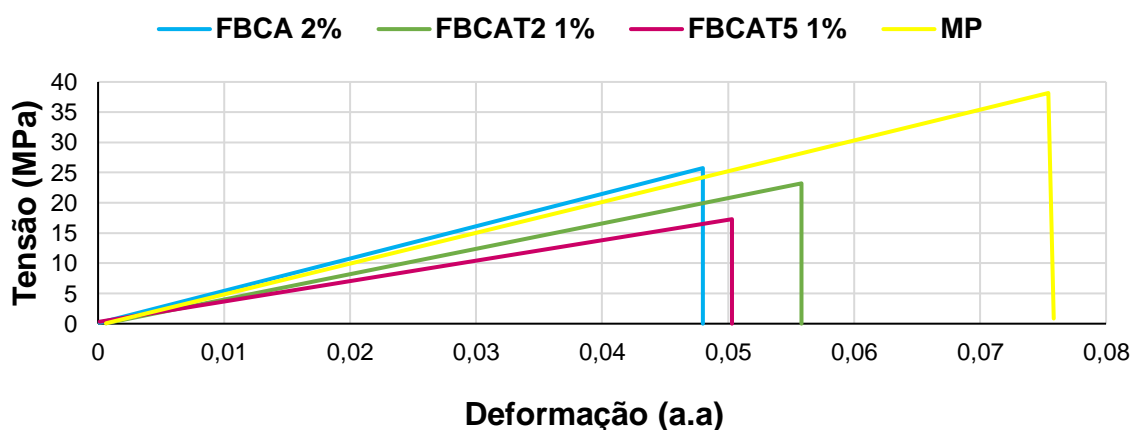


Fonte: Elaborado pela Autora, 2025.

Entre as séries tratadas, aquelas tratadas com 5% de NaOH apresentaram os menores valores de Limite de Resistência à Tração (LRT). A série que mais se aproximou da Matriz Plena (MP) foi a FBCAT5 1%, registrando um LRT de 17,246 MPa. Entretanto, a série FBCAT5 3% apresentaram o menor valor de módulo de elasticidade, indicando que esses compósitos são menos rígidos e oferecem maior flexibilidade e deformação sob a aplicação de forças externas.

A Figura 33 mostra um gráfico de Tensão x Deformação que compara os melhores resultados obtidos no ensaio mecânico de tração dos compósitos fabricados tanto não tratados quanto tratados com 2% e 5% de NaOH em relação a matriz plena.

**Figura 33** - Gráfico de Tensão x Deformação da matriz plena (MP) em relação aos melhores compósitos de cada serie fabricada.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2025.

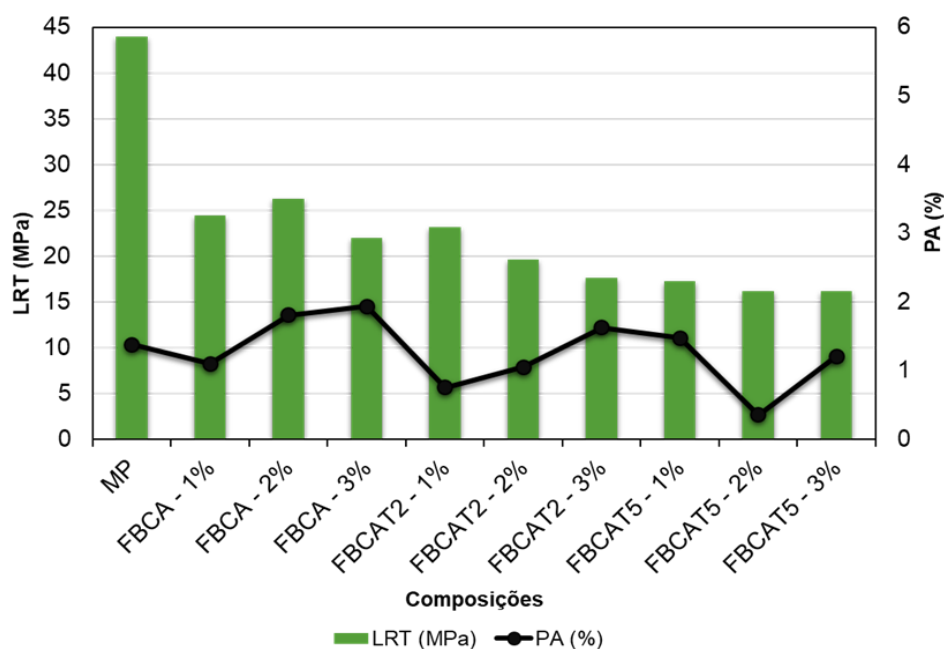
É possível observar que nenhum dos compósitos superou o Limite de Resistência à Tração (LRT) da Matriz Plena (MP). Dentre os compósitos fabricados sem tratamento alcalino, aquele com 2% de fibras apresenta maior valor de LRT. Já entre os compósitos tratados com 2% de NaOH, o que apresentou maior LRT foi o com 1% de fibras. Entre os compósitos tratados com 5% de fibras, o que apresentou maior LRT também foi com 1% de fibras.

O tratamento com NaOH parece alterar as propriedades dos compósitos. Embora possa reduzir a resistência à tração, também parece alterar a flexibilidade (alongamento) e a rigidez (módulo de elasticidade). Essas alterações podem ser benéficas dependendo das necessidades específicas da aplicação. Portanto, se a aplicação requer um material mais flexível ou menos rígido, os compósitos tratados com NaOH podem ser mais adequados, apesar de sua menor resistência à tração.

No entanto, se a resistência à tração for a propriedade mais importante, os compósitos sem tratamento ou a MP podem ser a melhor escolha.

A Figura 34 exibe um gráfico que correlaciona os resultados do Limite de Resistência à Tração (LRT) com os resultados da Porosidade Aparente (PA).

**Figura 34** - Gráfico do Limite De Resistência a Tração X Porosidade Aparente.



**Fonte:** Elaborado pela Autora, 2025.

Na Figura 34 é possível observar que a Matriz Plena (MP) exibe o maior Limite de Resistência à Tração (LRT), indicando sua alta resistência à tração. No entanto, também apresenta uma porosidade moderada. Nos compósitos sem tratamento alcalino (FBCA), o aumento da proporção de fibras resulta em maior LRT, mas também está associado à maior porosidade, o que pode afetar a durabilidade desses compósitos.

Os compósitos tratados com 2% de NaOH (FBCAT2) apresentam um valor de LRT razoável e menor porosidade, sugerindo um equilíbrio entre resistência e porosidade. Já os compósitos tratados com 5% de NaOH (FBCAT5) exibem a menor porosidade entre todos os compósitos, mas também apresentam o menor LRT quando comparados aos demais.

Os resultados obtidos ressaltam a relevância de levar em consideração tanto a resistência quanto a porosidade ao projetar materiais compósitos para aplicações específicas.

A Tabela 7 realiza uma comparação do LRT (Limite de Resistência à Tração) dos compósitos fabricados neste estudo com aqueles produzidos por outros pesquisadores que também empregaram a mesma fibra, mesma matriz, o mesmo tratamento e a mesma porcentagem de inserção de fibras. Além disso, a tabela apresenta materiais comerciais disponíveis no mercado que demonstram valores de LRT similares aos obtidos com o compósito fabricado neste trabalho.

Tabela 7 - Comparativo dos resultados de tração obtidos com a literatura.

<b>Material</b>	<b>Limite de Resistência à Tração (MPa)</b>	<b>Fonte</b>
FBCA - 2%	26,24	Este Trabalho
CAST	20,00	(Lopes <i>et al.</i> , 2019)
FBCAT2 - 1%	23,13	Este Trabalho
CCAT2%	24,77	(Santos, 2023)
FBCAT5 - 1%	17,24	Este Trabalho
FCAT5%	23,08	(Souza, 2021)
Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	24,00 a 31,00	(NITAPLAST, 2022)
Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)	6,00 a 12,00	(DREGER, 2017)
Policloreto de vinila (PVC)	10,00 a 25,00	(BRASKEN, 2023)

**Fonte:** Elaborado pela Autora, 2025.

Os resultados da Tabela 7 demonstram que os materiais desenvolvidos neste estudo possuem características mecânicas semelhantes aos materiais já utilizados e estudados anteriormente. Adicionalmente, ao considerar os intervalos de valores para materiais comerciais, como o Polietileno de Alta Densidade (PEAD), o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) e o Policloreto de Vinila (PVC), pode-se observar que os limites de resistência à tração obtidos estão próximos das faixas comumente encontradas na literatura.

Portanto, os resultados apresentados reforçam a viabilidade e a relevância dos compósitos desenvolvidos neste estudo, justificando sua aplicação em diversas áreas, especialmente onde não se exige alta resistência mecânica. Por exemplo, eles podem ser adequados para uso como forros e divisórias em construções internas. Além disso, a investigação sobre o tratamento químico com hidróxido de sódio revelou-se essencial para compreender seu impacto nas propriedades físicas e estruturais das fibras, contribuindo para a otimização do desempenho dos compósitos em aplicações específicas.

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 Considerações finais

Os resultados deste estudo demonstraram que o tratamento químico das fibras do bagaço de cana-de-açúcar influencia suas propriedades físicas e estruturais. A análise dos Sólidos Solúveis Totais (SST) confirmou a remoção eficaz de impurezas após o tratamento com NaOH, evidenciada pela redução do °Brix e do pH, garantindo fibras mais limpas para aplicação em compósitos. Além disso, a determinação da massa específica revelou diferenças entre as fibras tratadas e não tratadas, sugerindo alterações estruturais resultantes do tratamento químico.

A análise morfológica confirmou que o tratamento com NaOH removeu ceras e impurezas, tornando a superfície das fibras mais rugosa e uniforme, especialmente nas tratadas com 5% de NaOH. Essas modificações favoreceram a adesão entre matriz e fibras, refletindo-se nas propriedades físicas dos compósitos. Os ensaios físicos mostraram que a adição de fibras reduziu a massa específica aparente dos compósitos, tornando-os mais leves. Além disso, a porosidade aparente e a absorção de água foram menores nos compósitos tratados, indicando uma estrutura mais homogênea e menos propensa à absorção de umidade.

Nos ensaios mecânicos, verificou-se que nenhum compósito superou o Limite de Resistência à Tração (LRT) da matriz plena, mas o compósito sem tratamento alcalino e com 2% de fibras apresentou o melhor desempenho. O tratamento com NaOH não aumentou significativamente a resistência à tração, apesar de melhorar a interação entre fibras e matriz. O alongamento dos compósitos foi inferior ao da matriz plena, enquanto o módulo de elasticidade variou, sendo maior nos compósitos tratados, o que indica maior resistência à deformação sob carga.

Dessa forma, as fibras do bagaço de cana-de-açúcar atuaram como carga nos compósitos, influenciando suas propriedades físicas e mecânicas. A leveza e a menor absorção de água dos compósitos tratados sugerem aplicações viáveis em setores que não exigem alta resistência mecânica, como revestimentos e divisórias. Além disso, o estudo reforça a importância da valorização de resíduos agroindustriais, promovendo uma alternativa sustentável e de menor custo, que contribui para a redução do impacto ambiental, considerando não apenas a substituição de materiais sintéticos, mas também o aproveitamento eficiente desses resíduos.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Investigar diferentes concentrações de NaOH e tempos de tratamento para determinar as condições ideais que maximizem a remoção de impurezas e melhorem as propriedades mecânicas das fibras de bagaço de cana-de-açúcar.
- Comparar compósitos fabricados com fibras de cana-de-açúcar e compósitos híbridos que combinam fibras de cana-de-açúcar com fibras sintéticas, como poliéster ou polipropileno e avaliar como a adição de fibras sintéticas influencia as propriedades mecânicas e de durabilidade dos compósitos.
- Avaliar a degradabilidade das fibras de cana-de-açúcar e fibras sintéticas em ambientes controlados que simulem condições naturais, como solo e água. Utilizando técnicas analíticas, como análise termogravimétrica e espectroscopia, para monitorar a degradação ao longo do tempo e sua influência nas propriedades dos compósitos.

## REFERÊNCIAS

- ABD EL-BAKY, Marwa. A., MEGAHED, Mona., EL-SAQQA, Hend. H., & ALSHORBAGY, Amal. E. *Mechanical properties evaluation of sugarcane bagasse-glass/polyester composites*. (2021). **Journal of Natural Fibers**, 18(8), 1163-1180. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15440478.2019.1687069>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- ALVES, Mayk. **Bagaço de cana é o principal resíduo da agroindústria no Brasil**. 2021. Disponível em: <https://agro20.com.br/bagaco-cana/>. Acesso em: 18 dez. 2024.
- AMUSA, Abiodun; AHMAD, Abdul; ADEWOLE, Jimoh. ***Mechanism and Compatibility of Pretreated Lignocellulosic Biomass and Polymeric Mixed Matrix Membranes: a review***. Membranes, [S.L.], v. 10, n. 12, p. 370, 26 nov. 2020. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/membranes10120370>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- APPC. **O que é o grau Brix?** 2019. Disponível em: [https://apcc.coop.br/pt\\_br/o-que-e-o-grau-brix/](https://apcc.coop.br/pt_br/o-que-e-o-grau-brix/). Acesso em: 12 dez. 2024.
- ARAÚJO, Artemisa. O.; MARTINS, Kassia. P. **Obtenção de compósitos híbridos de fibras de vidro e fibras do bagaço de cana-de-açúcar com foco na aplicação em telhas poliméricas**. TCC, Curso de Engenharia Civil, Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, Goianésia, GO, 57p. 2022. Disponível em: <http://repositorio.aee.edu.br/jspui/handle/aee/18842>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- ASKELAND, Donald. R.; WRIGHT, Wendelin J. **Ciência E Engenharia Dos Materiais**. 4. ed. Edição Norte Americana. Cengage Learning, 2019. 550 p. ISBN: 9788522128112.
- ASTM D 2734 – **Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2009.
- ASTM D 570 – **Standard Test Method for Water Absorption of Plastics**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 1998.
- ASTM D 638-14, **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM D 792 – **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2008.
- BARTOS, András; UTOMO, Benny Putra; KANYAR, Barnabás; ANGGONO, Juliana; SOETAREDJO, Felycia Edi; MÓCZÓ, János. *Reinforcement of polypropylene with alkali-treated sugarcane bagasse fibers: mechanism and consequences*. **Composites Science and Technology**, v. 200, p. 108, 2020. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353820322181>. Acesso em: 2 dez. 2024.

BECKER, Daniela. **Introdução à ciência e engenharia dos materiais e classificação dos materiais**. 2017. Disponível em: [https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/2166002/LOM3092/aula\\_1\\_\\_\\_classificacao\\_aos\\_materiais.pdf](https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/2166002/LOM3092/aula_1___classificacao_aos_materiais.pdf). Acesso em: 25 jan. 2025.

BELTRAMI, Lílian Vanessa Rossa, CRISTINE, Scienza, ZATTERA, Ademir José. Efeito do tratamento alcalino de fibras de Curauá sobre as propriedades de compósitos de matriz biodegradável. **Polímeros**. 2014, v. 24, n. 3. pp. 388-394. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/polimeros.2014.024>. Acesso em: 20 jan. 2025.

BORGES, Ana Paula Silva Nascentes; MOTTA, Leila Aparecida De Castro; PINTO, Eliane Bernardes. Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 16364-126369, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/LprhPDswVZzMg6ZkydLbh7f/#>. Acesso em: 15 fev. 2025.

BRESSIANI JUNIOR, Ilor; KEINERT, André Christian; ELLENBERGER, Alessandro; BELINI, Ugo Leandro. **Fibras Vegetais e Compósitos na Indústria Automotiva**. Mix Sustentável, Florianópolis, v. 6, n. 4, p. 129-138, ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n4.129-138>. Acesso em: 16 dez. 2024.

CALLISTER, William. D. Júnior. e RETHWISCH. David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. LTC – Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A., 10ª edição. 944 P. Rio de Janeiro, 2020. ISBN 978-11-194-5391-8.

CARDOSO, Terezinha F; WATANABE, Marcos DB; SOUZA Alexandre; CHAGAS, Mateus F; CAVALETT, Otávio; MORAIS, Edvaldo R. et al. *Economic, environmental, and social impacts of different sugarcane production systems*. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**. 2018; p. 68-82. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/bbb.1829>. Acesso em: 15 jan. 2025.

CARMELLO, Guilherme Fernando. **Estudo da adesão entre fibras poliméricas e vegetais em matriz cimentícia**: caracterização físico-química e mecânica. 2021. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso Engenharia de Materiais, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74133/tde-29112021-163147/publico/ME9872048COR.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2025.

CASTRO NETO, A. G., MOLINA, L. R., GONÇALVES, L. C., & JAYME, C. G. **Parâmetros de fermentação de silagens de cana-de-açúcar submetidas a diferentes tratamentos**. 2008. Arquivo Brasileiro De Medicina Veterinária E Zootecnia, 60(5), 1150–1156. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352008000500017>

CHANDEL, Anuj K; ALBARELLI, Juliana Q; SANTOS, Diego T; CHUNDAWAT, Shishir Ps; PURI, Munish; MEIRELES, Maria Angela A. *Comparative analysis of key technologies for cellulosic ethanol production from Brazilian sugarcane bagasse at a commercial scale*. **Biofuels, Bioproducts And Biorefining**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 994-

1014, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bbb.1990>. Acesso em: 29 jan. 2025.

COELHO, Karolina V. De S.; SANTANA, Jackson Cesar Lopes De; BASTOS, Daniele Cruz; LÍBANO, Elaine Vidal Dias Gomes; PEREIRA, Patricia Soares Da Costa. **COMPÓSITOS PEAD/BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: influência do processamento e fonte de pead.** Univap, São José dos Campos, v. 26, n. 51, p. 130-144, dez. 2020. Disponível em: <https://revista.univap.br/index.php/revistaunivap/article/view/2425/1598>. Acesso em: 17 fev. 2025.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira.** 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>. Acesso em: 18 fev. 2025.

DEL PINO, Gilberto García. BEZAZI, Abderrezak, Boumediri, HAITHAM, Kieling, Antonio Claudio. *et al.*, *Hybrid epoxy composites made from treated curauá fibres and organophilic clay.* **Revista de Materiais Compósitos.** 2021; V 55 (1):57-69. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0021998320945785#>. Acesso em: 15 dez. 2024.

DI FIDIO, Nicola. **Bioprodotti sostenibili dalla lignina: microrganismi fantastici e dove trovarli.** 2021. Disponível em: <https://www.microbiologiaitalia.it/batteriologia/bioprodotti-sostenibili-dalla-lignina-microrganismi-fantastici-e-dove-trovarli/>. Acesso em: 15 dez. 2024.

DORI, Décio Júnior Lovison. **Análise do bagaço de cana-de-açúcar como fonte de energia.** 2022. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. Cap. 4. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/items/6f096154-0019-455a-8f0c-7e8675da7d49>. Acesso em: 20 jan. 2025.

EMBRAPA. **Cana.** 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana>. Acesso em: 18 jan. 2025.

EMBRAPA. **Correção da acidez do solo.** 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/producao/sistema-de-cultivo/arroz-irrigado-na-regiao-tropical/correcao-do-solo-e-adubacao/correcao-da-acidez-do-solo>. Acesso em: 29 jan. 2025.

FIAT. **UNO ECOLOGY.** 2024. Disponível em: [https://www.fiat.com.br/institucional/uno\\_ecology.html](https://www.fiat.com.br/institucional/uno_ecology.html). Acesso em: 18 fev. 2025

FLOREZ-ORREGO, Daniel Alexander. **Process synthesis and optimization of syngas and ammonia production in nitrogen fertilizers complexes: energy, energy integration and CO<sub>2</sub> emissions assessment.** 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Energia de Fluidos) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/332798115\\_Process\\_Synthesis\\_and\\_Opti](https://www.researchgate.net/publication/332798115_Process_Synthesis_and_Opti)

mization\_of\_Syngas\_and\_Ammonia\_Production\_in\_Nitrogen\_Fertilizers\_Complexes\_Energy\_Integration\_and\_CO2\_Emissions\_Assessment. Acesso em 24 jan. 2025.

FLORINDO, Débora Nathália Fernandes. **Obtenção de compósitos poliméricos com fibras naturais de bagaço de malte**. 2017. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia Química, Departamento Acadêmico de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa. Disponível em: [https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16550/1/PG\\_COENQ\\_2017\\_2\\_11.pdf](https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16550/1/PG_COENQ_2017_2_11.pdf). Acesso em: 10 fev. 2025.

FORNARI JUNIOR, Celso Carlino Maria. **FIBRAS VEGETAIS: PARA COMPOSITOS POLIMERICOS**. Editus Editora da UESC; 1ª ed. BAHIA. 2017. 198p. ISBN: 978-8574554365.

FURTADO, Josélia Borges De Moura; FURTADO FILHO, Paulo Afonso; OLIVEIRA, Thalyta Pereira; CAETANO, Marlo Rodrigues De Sousa; ARAÓJO, Inês Maria De Souza; FIGUEIREDO, Francisco Cardoso; SANTOS JÚNIOR, José Ribeiro Dos. Caracterização Química da Fibra do Caule da Palmeira de Babaçu Natural e Após Tratamento. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, Piauí, v. 5, n. 3, p. 56-64, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.25286/rep.v5i3.1254>. Acesso em: 16 fev. 2025.

GIBSON, Ronald F. *Principles of Composite Material Mechanics*. 2016. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 700 p. **Engineering & Technology, Physical Sciences**. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/b19626>. Acesso em: 09 jan. 2025.

HANGAR MMA. **Qual a liga mais usada na construção de aeronaves e por que?** 2020. Disponível em: <https://hangarmma.com.br/blog/liga-mais-usada-na-construcao-de-aeronaves/>. Acesso em: 17 fev. 2025.

HERZMANN, Tiago Vinícius. **Produção e determinação de propriedades mecânicas de compósitos reforçados com fibras de sisal**. 2022. 71 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós- Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville. Cap 2. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/241029>. Acesso em: 05 fev. 2025.

LAZARINI, Rafael Gouveia. **Pré-tratamento de fibras de bagaço de cana-de-açúcar e seu uso em altos teores em compósitos com polipropileno via mistura termocinética**. 2020. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1123078>. Acesso em: 02 fev. 2025.

LEITE, Fernando Luís Pinheiro Pires. **Durabilidade de compósitos de matriz termoplástica/termoendurecível reforçada com fibras sintéticas e naturais**. 2017. 21 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros, Universidade do Minho, Portugal, 2017.

LITAIFF, Hannah Alagoas. **INFLUÊNCIA DA MERCERIZAÇÃO EM FIBRAS DE MALVA NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE COMPÓSITO À BASE DE POLIPROPILENO**. 2023. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas - Ufam, Manaus. Cap. 3. Disponível em: <https://riu.ufam.edu.br/handle/prefix/6818>. Acesso em: 04 fev. 2025.

LOPES, Bruno Leonardy S. Polímeros reforçados por fibras vegetais uma revisão sobre esses compósitos. **Editora Blucher**, 2017. E-book. ISBN 9788580392920. Disponível em: <https://openaccess.blucher.com.br/download-pdf/237>. Acesso em: 28 jan. 2025.

LOPES, Carlos E.P; GOMES, Igor D.S; VILHENA, Edil S.D; PEREIRA, Léo C.D.O; VILHENA, Edielson S. D; DIAS, Rodrigo D.S.M; OLIVEIRA, Antonio B.D.S; CINTRA, Álvaro A.S; COSTA, Deibson S.D; BANNA, Wassim R.E. Colmos de caule de bambu e da cana-de-açúcar para a fabricação de compósitos poliméricos. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 5, n. 6, p. 6364-6375, 2019. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/1866/1844>. Acesso em: 20 fev. 2024.

MEC – Ministério da Educação. **Areia de bagaço de cana pode ajudar na preservação ambiental**. 2017. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/ultimas-noticias/222-537011943/44501-areia-de-bagaco-de-cana-pode-ajudar-na-preservacao-ambiental>. Acesso em: 18 fev. 2025.

MERLINI, Claudia. **Ciência e Tecnologia de Compósitos Poliméricos**. 1º edição. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2021. 328 p. Disponível em: <https://artliber.com.br/amostra/compositos-polimericos.pdf>. 25 jan. 2025.

METTLER TOLEDO. **Brix, o Conhecimento Essencial**. 2023. Disponível em: <https://www.mt.com/br/pt/home/perm-lp/product-organizations/ana/brix-meters.html>. Acesso em: 14 jan. 2025.

MINOTTO, Ana Carolina Corso; MOURA, Adriana Da Silva; FRANKENBERG, Claudio Luis. **Caracterização Química de Fibras Naturais: Determinação do Teor de Lignina, Holocelulose, Extrativos e Cinzas**. 2018. PUCRS. Disponível em: <https://editora.pucrs.br/edipucrs/acessolivre/anais/sic/assets/edicoes/2018/arquivos/27.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2025.

MORENO, Adrian; SIPPONEN, Mika H. *Lignin-based smart materials: a roadmap to processing and synthesis for current and future applications*. *Materials Horizons*, [S.L.], v. 7, n. 9, p. 2237-2257, jun. 2020. **Royal Society of Chemistry (RSC)**. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/mh/d0mh00798f>. Acesso em: 15 fev. 2025.

MZIMELA, Zimele Nkosivele Treasure; LINGANISO, Linda Zikhona; REVAPRASADU, Neerish; MOTAUNG, Tshwafo Elias. *Comparison of Cellulose Extraction from Sugarcane Bagasse Through Alkali*. **Materials Research**, [S.L.], v. 21, n. 6, p. 21-27, 29 out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0750>. Acesso em: 30 jan. 2025.

NITAPLAST. **Polietileno de Alta Densidade (PEAD)**. 2022. Disponível em: [https://www.nitaplast.com.br/v3/wp-content/uploads/2022/11/datasheet\\_Nitalen.pdf](https://www.nitaplast.com.br/v3/wp-content/uploads/2022/11/datasheet_Nitalen.pdf). Acesso em: 25 jan. 2025.

NETO, F. Levy; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. Editora Blucher. 2ª edição. 416 P. São Paulo. 2016. ISBN 978-85-212-1079-5.

NOGAROTO, Leonardo Santini. **Uso da energia de cogeração em usina sucroalcooleira para irrigação da cana-de-açúcar**. 2023. 60 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Agrônoma. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Ilha Solteira. Cap 2. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/250093>. Acesso em: 17 fev. 2025.

OLIVEIRA, Odivan Coutinho De. **Avaliação de fibras de bagaço de cana-de-açúcar in natura e modificada para aplicação em compósitos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Ciência dos Materiais) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes. Disponível em: [https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2019/04/DISSERTA%C3%87%C3%83O\\_Odivan\\_Rev.04.pdf](https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2019/04/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Odivan_Rev.04.pdf). Acesso em: 16 fev. 2025.

PAIVA, Fábio Friol Guedes De. **Compósito de borracha natural com incorporação de bagaço da cana-de-açúcar**. 2018. 66 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/154986>. Acesso em: 10 fev. 2025.

PARAMESWARANPILLAI, Jyotishkumar; RANGAPPA, Sanjay; SIENGCHIN, Suchart; JOSE, Seno. **Bio-based epoxy polymers, blends and composites: synthesis, properties, characterization and applications**. 2021. [S.L.]. p. 387. WILEY - VCH. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/9783527823604>. Acesso em: 15 fev. 2025.

PAVANATI, Henrique Cezar. **Ciência e tecnologia dos materiais**. São Paulo: Editora Pearson, 2015. 196 p.

PEREIRA, P. H. F., ROSA, M. F., CIOFFI, M. O. H., BENINI, K. C. C. C., MILANESE, A. C., VOORWALD, H. J. C., MULINARI, D. R. *Vegetal fibers in polymeric composites: a review*. **Polímeros**. vol. 25, n.1, p. 9-22, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/fMdzmd8wz3RJypPD4xW9jww/>. Acesso em: 15 fev. 2025.

POLETTI, Matheus. **Compósitos termoplásticos com madeira-uma breve revisão**. *Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 2, n. 4, p. 42-48, 2017.

RANI, A., MONGA, S., BANSAL, M., & SHARMA, A. (2017). *Bionanocomposites reinforced with cellulose nanofibers derived from sugarcane bagasse*. **International Journal of Biological Macromolecules**, 105, 1350-1358. Disponível em: <https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pc.24112#:~:text=Thermoplastic%20starch%20%28TPS%29%2Fcellulose%20nanofiber%20%28CNF%2>

9%20based%20nanocomposites%20were,alkali%20steam%20explosion%20coupled%20with%20high%20shear%20homogenization. Acesso em: 19 jan. 2025.

REBELO, Viviane; SILVA, Yuri Da; FERREIRA, Saulo; TOLEDO FILHO, Romildo; GIACON, Virginia. Effects of mercerization in the chemical and morphological properties of amazon piassava. **Polímeros**, Manaus, v. 29, n. 1, p. 1-6, mar. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/Nqhtg6HsKVBg8fyt7GJ8jTM/?lang=en>. Acesso em: 10 fev. 2025.

REDELEASE. **Propriedades da Resina em estado Líquido**. 2021. Disponível em: <https://www.redelease.com.br/resina-ortoftalica-laminacao-com-catalisador-1-030-kg.html#additional>. Acesso em: 29 jan. 2025.

RODRIGUES, Clauber Dalmas. **Características da-cana-de-açúcar**. 2015. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/jaojaojaojao/caracteristicas-dacananadeacucar>. Acesso em: 17 fev. 2025.

SAKAMOTO, Clóvis. **Resina Poliéster Insaturado** 2018. Disponível em: <https://silaex.ind.br/resina-poliester>. Acesso em: 27 jan. 2025.

SANTANA, Ana Lucia. **Cana-de-açúcar** - História e Cultivo no Brasil. 2019. Disponível em: <https://www.infoescola.com/plantas/cana-de-acucar>. Acesso em 18 fev. 2025.

SANTOS, Deborah Júlia Dos. **A influência do tratamento alcalino nas fibras do bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos de matriz poliéster ortoftálica**. 2023. 78 f. TCC (Graduação), bacharelado em Engenharia de Materiais – Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2023. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br/jspui/handle/prefix/6482>. Acesso em: 1 fev. 2025.

SANTOS, B. Henrique. **Caracterização de compósitos de amido termoplástico com fibras de bagaço de cana-de-açúcar**. Tese (Mestrado em Nanociência e Materiais Avançados) – Universidade Federal do ABC. São Paulo, p. 116. 2020. Disponível em: [http://biblioteca.ufabc.edu.br/index.php?codigo\\_sophia=122300](http://biblioteca.ufabc.edu.br/index.php?codigo_sophia=122300). Acesso em: 20 jan. 2025.

SANTOS, Danielton Gomes Dos. **Estudo Termo-Hídrico e Caracterização Mecânica de Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados com Fibra Vegetal: Simulação 3d E Experimentação**. 2017. 172 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. Cap. 2. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/946>. Acesso em: 05 fev. 2025.

SANTOS JÚNIOR, Zulmar Jofli Dos. **Fabricação e caracterização de um compósito com matriz de resina poliéster ortoftálica e carga de fibras de agave angustifolia haw**. 2017. 137f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/24658>. Acesso em: 1 fev. 2025.

SCHNEIDER, Jackson. Ita: pioneirismo, desenvolvimento e futuro. **Aerovisão**: A Revista da Força Aérea Brasileira, Brasília, v. 45, n. 255, p. 66-66, jan. 2018. ISSN: 1518-8396. Disponível em: [https://issuu.com/portalfab/docs/aerovisao\\_255\\_jan\\_fev\\_mar\\_2018](https://issuu.com/portalfab/docs/aerovisao_255_jan_fev_mar_2018). Acesso em: 16 jan. 2025.

SHOJAEIARANI, Jamileh., Bajwa, Dilpreet. S., BAJWA, Sreekala. G. (2019). Properties of densified solid biofuels in relation to chemical composition, moisture content, and bulk density of the biomass. **BioRes.** 14(2), 4996-5015. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/properties-of-densified-solid-biofuels-in-relation-to-chemical-composition-moisture-content-and-bulk-density-of-the-biomass/>. Acesso em 15 dez. 2024.

SILAEX. **Resina Poliéster Insaturado**: Resinas Ortoftálicas. 2022. Disponível em: <http://www.silaex.com.br/poli%C3%A9ster.htm>. Acesso em: 29 jan. 2025.

SILVA, Bruna Giovana Cunha Da. **ESTUDO DE MATERIAIS COMPÓSITOS HÍBRIDOS NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA E AEROESPACIAL E AVALIAÇÃO DE ARGILA ORGANOFÍLICA E RESINA EPÓXI PARA APLICAÇÃO EM USINAGEM NO TORNO CNC**. 2019. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus. Cap. 2.

SILVESTRIM, Rafael Ghesla. **Desenvolvimento de compósito biodegradável com matriz de poli ácido láctico reforçado com fibra vegetal de alta resistência da árvore embira**. 2018. 81 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Cap. 2. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/181868#>. Acesso em: 27 jan. 2025.

SOARES, M. R. F. **Materiais compósitos, aspectos gerais e aplicações**. Universidade de Caxias do Sul. 2017. Disponível em: <https://www.ucsminhaescolha.com.br/site/midia/arquivos/05-12-17-materiais-compositos-e-aplicacoes1.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2025.

SOUZA, Jennifer Cardoso De. **Pré-tratamentos das fibras de bagaço de cana-de-açúcar visando aplicação em compósitos poliméricos**. 2021. 42 f. TCC (Bacharelado em Química) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC, Santo André, 2021. Disponível em: [https://ccnh.ufabc.edu.br/arquivos/CENTRAL/4.Ensino/1.Graduacao/TCCs/Jennifer\\_Cardoso\\_de\\_Souza-versao\\_final\\_TCC\\_BacQui-QS.2021.2.pdf](https://ccnh.ufabc.edu.br/arquivos/CENTRAL/4.Ensino/1.Graduacao/TCCs/Jennifer_Cardoso_de_Souza-versao_final_TCC_BacQui-QS.2021.2.pdf). Acesso em: 13 fev. 2025.

SOUZA, Yuri Gomes De. **Obtenção e caracterização de compósitos de polipropileno reforçados com bagaço de cana-de-açúcar**. 2021. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/16174>. Acesso em: 5 jan. 2025.

TAVARES, Felipe Fernando Da Costa; ALMEIDA, Marcos Danilo Costa De; SILVA, João Antonio Pessoa Da; ARAÓJO, Ludmila Leite; CARDOZO, Nilo Sérgio Medeiros;

SANTANA, Ruth Marlene Campomanes. Thermal treatment of açai (*Euterpe oleracea*) fiber for composite reinforcement. **Polímeros**, [S.L.], v. 30, n. 1, p. 327-345, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/ZWznZsT8RsLvQ4fshfQJPXc/?lang=en>. Acesso em: 16 fev. 2025.

TEODORO, Lucas Guidugli. **Determinação do °Brix na cana-de-açúcar**. 2022. Revista Canavieiros. Disponível em: <https://www.revistacanavieiros.com.br/determinacao-do-brix-na-cana-de-acucar>. Acesso em: 17 fev. 2025.

TUNES, Suzel. **Fibras vegetais são usadas para produzir peças automotivas: material renovável é opção para tornar a indústria mais sustentável**. 2023. Disponível em: <https://umsoplaneta.globo.com/energia/noticia/2023/01/15/fibras-vegetais-sao-usadas-para-produzir-pecas-automotivas.ghtml>. Acesso em: 16 fev. 2025.

VIDYASHRI, V.; LEWIS, HENRITA; NARAYANASAMY, P.; MAHESHA, G T; BHAT, K. SUBRAHMANYA. *Preparation of chemically treated sugarcane bagasse fiber reinforced epoxy composites and their characterization*. **Cogent Engineering**, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 1-11, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1708644>. Acesso em: 29 jan. 2025.

YARA BRASIL. **Quem São os Maiores Produtores de Cana-de-Açúcar?** 2023. Disponível em: <https://www.yarabrasil.com.br/conteudo-agronomico/blog/producao-mundial-de-cana-de-acucar/>. Acesso em: 17 fev. 2025.

ZAINAL, Mustafa.; SANTIAGOO, Ragonathan.; MUSTAFA, Wan Azani.; AYOB, Afizah. *Thermal, Crystallinity and Microstructure Characteristics of Chemical Modification on Sugarcane Bagasse Powder*. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, [S. l.], v. 59, n. 1, p. 45–53, 2020. Disponível em: [https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid\\_mechanics\\_thermal\\_sciences/article/view/3203](https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid_mechanics_thermal_sciences/article/view/3203). Acesso em: 30 jan. 2025.

ZAMBONI, I. G. **O uso do bagaço de cana-de-açúcar para produção de biogás**. Disponível em: <https://biogaseenergia.com.br/o-uso-de-bagaco-de-cana-de-acucar-para-producao-de-biogas>. Acesso em: 5 fev. 2025.

ZERO HORA. **Ford pesquisa o uso do bambu na produção de componentes**. 2017. Jornal Digital. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/comportamento/carros/noticia/2017/04/ford-pesquisa-o-uso-do-bambu-na-producao-de-componentes-9779071.html>. Acesso em: 18 fev. 2025.