



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

DÉBORAH JÚLIA COSTA DOS SANTOS

**A INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO ALCALINO NAS FIBRAS DO
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E
MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER
ORTOFTÁLICA**

Ananindeua, PA
2023

DÉBORAH JÚLIA COSTA DOS SANTOS

**A INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO ALCALINO NAS FIBRAS DO
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E
MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER
ORTOFTÁLICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais, do Campus Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do Grau de Bacharela em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa

Coorientador: Me. Eng. Luis Felipe Alencar Brandão

Ananindeua, PA

2023

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)

S237i Santos, Déborah Júlia Costa dos.
A INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO ALCALINO NAS FIBRAS DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS COMPOSTOS DE MATRIZ POLIÉSTER ORTOFTÁLICA /
Déborah Júlia Costa dos Santos. — 2023.
78 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Coorientador(a): Prof. Me. Luis Felipe Alencar Brandão
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2023.

1. Fibras. 2. Cana-de-Açúcar. 3. Compósitos. 4. Tratamento Alcalino. I. Título.

CDD 620.11

DÉBORAH JÚLIA COSTA DOS SANTOS


**A INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO ALCALINO NAS FIBRAS DO BAGAÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS
COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER ORTOFTÁLICA**

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


Data da aprovação: 13/12/2023.

Conceito: Excelente


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **DEIBSON SILVA DA COSTA**
Data: 16/12/2023 22:43:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


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

Documento assinado digitalmente
 **LUIS FELIPE ALENCAR BRANDAO**
Data: 17/12/2023 12:04:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente
 **MARCOS VINICIUS DA SILVA PAULA**
Data: 18/12/2023 14:11:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcos Vinicius da Silva Paula
(FEMat/CAMPANIN/UFPA – Examinador Interno)

Documento assinado digitalmente
 **DILSON NAZARENO PEREIRA CARDOSO**
Data: 19/12/2023 19:35:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Dilson Nazareno Pereira Cardoso
(FEQ/ITEC/UFPA – Examinador Externo)

"O maior prazer na vida é fazer aquilo que as pessoas dizem que você não é capaz de fazer."

Walter Bagehot

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, que com sua infinita bondade guia cada passo meu, concedendo força e sabedoria para perseguir meus sonhos. Em segundo lugar, dedico minha sincera devoção a Nossa Senhora de Nazaré, a quem recorro nos momentos de aflição, pedindo que, com sua intercessão junto ao seu filho, eu possa superar desafios e encontrar paz.

Agradeço a toda minha família, em especial à minha mãe, Zenaide Costa, e ao meu pai, Licínio Amorim, que sempre tornaram o impossível possível para realizar este sonho. Muito obrigada por todo o carinho, apoio e compreensão. Agradeço à minha irmã Samantha Costa por pacientemente me ajudar a desfiar e limpar a cana, por seu carinho e suas palavras de conforto. Sua presença constante, apoio e estímulo foram fundamentais para que eu persistisse. Estendo meus agradecimentos aos meus tios, tias e primos, que sempre me acolhem com abraços calorosos nos momentos difíceis. Gostaria de expressar minha gratidão especial ao Tio Beto, Tio Fury, Tia Zilma e às minhas primas Renata, Daniele e Michele, que sempre estiveram presentes para me ajudar nos momentos mais desafiadores.

Agradeço à minha avó Julia Costa (*in memoriam*), que sempre acreditou em mim, mesmo quando eu mesma duvidava. Sei que a senhora está aí em cima, contente com esta minha conquista. Suas palavras de encorajamento e fé continuam a ecoar em meu coração, guiando-me nos momentos desafiadores.

Agradeço ao Sr. Joaquim, o gentil vendedor de cana-de-açúcar, que nos cedeu o bagaço da cana com paciência, alegria e boa vontade.

Agradeço à técnica de laboratório, Laura Brito, por sua supervisão durante o estágio. Sua generosidade ao compartilhar conhecimento, ensinar em curto prazo, suas conversas e sábios conselhos são gestos pelos quais sou profundamente grata e que levarei para toda a vida.

Agradeço ao Laboratório de Catálise e Biocatálise e ao Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados (LAMPS) por cederem seus equipamentos e instalações, contribuindo para a conclusão deste trabalho.

Agradeço à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua, e aos professores pelos ensinamentos valiosos. Meu agradecimento especial vai para meu orientador, Professor Dr. Deibson Costa, pela paciência, orientação e disponibilidade em ajudar.

Agradeço sinceramente ao meu coorientador, Luis Brandão, pela dedicação, pelas correções, orientação e boa vontade ao longo deste processo. Agradeço especialmente por não nos abandonar, mesmo nos momentos em que tornamos seu trabalho mais difícil.

As amigas que fiz no início do curso, Raiza Garcia, Izabely Barros e Bianca Azevedo, que, devido às circunstâncias da vida, tomaram caminhos diferentes, mas que continuam ao meu lado, torcendo por esta vitória que não será apenas minha, mas sim nossa!

Aos amigos que conquistei no decorrer do curso, Izabela Pampolha, Leonardo Biasí, Ana Karolina e Michele Santos agradeço pelo carinho, pela amizade pelas experiências compartilhadas, pelas tardes memoráveis no "Preço Baixo", onde não apenas lanchamos, mas também compartilhamos risadas e momentos especiais, a vocês reservo um lugar quentinho em meu coração.

E expresso minha gratidão às amigas que fiz no final do curso, Thamina Rendeiro, Andreza Dias e Maria Eduarda. Agradeço por tornarem minhas manhãs mais alegres e por compartilharem momentos tão especiais. Vocês são verdadeiramente maravilhosas, e quero levar essa amizade para toda a vida. Obrigada pela companhia e pelas memórias preciosas que construímos juntas.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho meu muito obrigada.

RESUMO

As fibras do bagaço de cana-de-açúcar são uma matéria-prima renovável e de baixo custo que pode ser utilizada para a produção de compósitos poliméricos, com uma série de benefícios ambientais e econômicos. Este trabalho tem como objetivo determinar as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos fabricados com diferentes proporções de fibras de bagaço de cana-de-açúcar tratadas com hidróxido de sódio (NaOH) em 2% e 5%, e fibras sem tratamento. As fibras foram submetidas a análise de determinação dos Sólidos Solúveis Totais (SST), massa específica e análise morfológica. Os compósitos foram fabricados manualmente, em moldes de silicone. Realizaram-se ensaios físicos e ensaio mecânico de tração. A análise dos SST mostrou que após 48 horas de lavagem e imersão o °Brix atingiu 0, evidenciando a ausência de SST na solução. O pH também diminuiu durante esse período, sugerindo que o processo foi eficaz na remoção de sólidos solúveis. A fibra de bagaço de cana-de-açúcar não tratada possui uma massa específica de 0,658 g/cm³, já as tratadas 0,919 g/cm³. A análise morfológica das fibras *in natura* do bagaço de cana-de-açúcar apresentou uma estrutura fibrosa com material residual e poros. O tratamento com 2% de NaOH resultou em fibras alinhadas, poros e redução do material residual, enquanto o tratamento com 5% de NaOH produziu fibras mais limpas e rugosas. Os compósitos sem tratamento exibiram menor massa específica, maior porosidade e absorção de água em comparação com a matriz plena, enquanto os compósitos com tratamento alcalino mostraram maior massa específica, porosidade e absorção de água em relação a matriz plena. O ensaio de tração realizado nos compósitos com e sem tratamento alcalino, não apresentou corpos de prova com limite de resistência a tração superior à matriz plena. Os compósitos tratados com 5% de NaOH demonstraram os melhores resultados de limite de resistência a tração revelando que o tratamento alcalino foi eficaz para melhorar as propriedades mecânicas. Os compósitos de bagaço de cana-de-açúcar foram considerados como carga, pois não contribuíram efetivamente para melhorar as propriedades mecânicas do compósito. Isso se deve ao fato de que as propriedades mecânicas do compósito não excederam as da matriz plena.

Palavras-chave: Fibras; Cana-de-Açúcar; Compósitos; Tratamento Alcalino.

ABSTRACT

Sugarcane bagasse fibers are a renewable and low-cost raw material that can be used to produce polymer composites, with a series of environmental and economic benefits. This work aims to determine the physical and mechanical properties of composites manufactured with different proportions of sugarcane bagasse fibers treated with sodium hydroxide (NaOH) at 2% and 5%, and untreated fibers. The fibers were subjected to analysis to determine Total Soluble Solids (TSS), specific mass and morphological analysis. The composites were manufactured manually in silicone molds. Physical tests and mechanical tensile tests were carried out. The TSS analysis showed that after 48 hours of washing and immersion the °Brix reached 0, demonstrating the absence of TSS in the solution. The pH also decreased during this period, suggesting that the process was effective in removing soluble solids. Untreated sugarcane bagasse fiber has a specific mass of 0.658 g/cm³, while treated fiber has a specific mass of 0.919 g/cm³. The morphological analysis of fresh fibers from sugarcane bagasse showed a fibrous structure with residual material and pores. Treatment with 2% NaOH resulted in aligned fibers, pores and reduced residual material, while treatment with 5% NaOH produced cleaner, rougher fibers. The untreated composites exhibited lower specific mass, greater porosity and water absorption compared to the full matrix, while the alkaline treated composites showed higher specific mass, porosity and water absorption compared to the full matrix. The tensile test carried out on the composites with and without alkaline treatment did not present specimens with a tensile strength limit higher than the full matrix. Composites treated with 5% NaOH demonstrated the best tensile strength limit results, revealing that the alkaline treatment was effective in improving mechanical properties. Sugarcane bagasse composites were considered as filler, as they did not effectively contribute to improving the mechanical properties of the composite. This is due to the fact that the mechanical properties of the composite did not exceed those of the full matrix.

Keywords: Fibers; Sugarcane; Composites; Alkaline Treatment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de classificação de diversos tipos de compósitos.	22
Figura 2 - Processo de cura do poliéster insaturado.	23
Figura 3 - Resina poliéster ortoftálica.	24
Figura 4 - Diferentes disposições de fibras para a produção de compósitos.	26
Figura 5 - Esquema de classificação das fibras.	27
Figura 6 - Ilustração da estrutura das fibras lignocelulósicas.	30
Figura 7 - Componentes estruturais das paredes celulares e orientação.....	31
Figura 8 - Cultivo de cana-de-açúcar.	32
Figura 9 - Representação esquemática da estrutura da Cana-de-Açúcar.....	33
Figura 10 - Comparativo de área e produção regional da cana-de-açúcar.	33
Figura 11 - Pré tratamento de fibras lignocelulósicas.....	35
Figura 12 - Representação esquemática do tratamento da superfície da fibra com NaOH.	37
Figura 13 - Fluxograma geral do processo.....	40
Figura 14 - Imagem ilustrativa do acelerador de cobalto, resina poliéster e iniciador.	42
Figura 15 - Bagaço de cana-de-açúcar na feira local.....	42
Figura 16 - Bagaço de cana-de-açúcar imerso em água destilada.	43
Figura 17 - Refratômetro digital (a), pHmetro de bancada e amostras utilizadas (b).	44
Figura 18 - Extração da fibra do bagaço da cana (a), a fibra extraída (b), a fibra sendo cortada (c) e a fibra cortada (d).....	44
Figura 19 - Fibras durante o tratamento alcalino.....	45
Figura 20 - Microscópio Eletrônico de Varredura.	46
Figura 21 - Fluxograma da confecção dos compósitos.	47
Figura 22 - Dimensão do corpo de prova para o ensaio de tração.....	47
Figura 23 - Corpo de prova da matriz plena e do compósito sem tratamento alcalino.	49
Figura 24 - Aparato utilizado para obter a massa imersa.	51
Figura 25 - a) Máquina utilizada no ensaio de tração, b) Corpo de prova rompido após o ensaio.....	51
Figura 26 - Micrografia da fibra <i>in natura</i>	54

Figura 27 – Micrografia da fibra tratada com 2% de NaOH.....	55
Figura 28 - MEV da fibra tratada com 5% de NaOH.....	56
Figura 29 - Compósitos obtidos após o processo de cura.....	57
Figura 30 - Representação gráfica dos resultados dos ensaios físicos.....	59
Figura 31 - Gráfico relacionando os ensaios.	60
Figura 32 - Análise dos resultados mecânicos de tração.	62
Figura 33 – Gráfico de Tensão X Deformação dos compósitos com fibras não tratadas.	63
Figura 34 - Gráfico de Tensão X Deformação dos compósitos com fibras tratadas com 2% de NaOH.	63
Figura 35 - Gráfico de Tensão X Deformação dos compósitos com fibras tratadas com 5% de NaOH.	64
Figura 36 - Gráfico Tensão X Deformação entre os melhores compósitos e a matriz plena.	65
Figura 37 - Gráfico do Limite De Resistência a Tração X Porosidade Aparente.	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens das fibras naturais como reforço.	28
Quadro 2 - Propriedades da Resina Poliéster Ortoftálica.	41
Quadro 3 - Nomenclatura dos compósitos fabricados.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de diversas fibras lignocelulósicas.....	29
Tabela 2 - Resultado das análises do °BRIX e pH.....	52
Tabela 3 - Resultado dos ensaios físicos.....	58
Tabela 4 - Dados obtidos pelo ensaio mecânico de tração.....	61
Tabela 5 - Comparativo dos resultados de tração obtidos com a literatura.....	67

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

Absorção de água (AA)
American Society for Testing and Materials (ASTM)
Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)
Bagaço de Cana-de-Açúcar (BCA)
Cana-de-Açúcar (CA)
Compósito de Cana-de-Açúcar (CCAST)
Compósito de Cana-de-Açúcar (CCAT2%)
Compósito de Cana-de-Açúcar (CCAT5%)
Corpo de Prova (CP)
Departamento de Ciências da Terra e Ecologia (COCTE)
e colaboradores (et al.)
Espectroscopia de Raios-X por Dispersão de Energia (EDS)
Field Emission Gun (FEG)
grau Celsius (°C)
Hectare (ha)
Hidróxido de Sódio (NaOH)
Laboratório de Engenharia Química (LEQ)
Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados (LAMPS)
Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LME)
Limite de Resistência a Tração (LRT)
Massa Específica Aparente (MEA)
Massa Imersa (M_i)
Massa Seca (M_s)
Massa Úmida (M_u)
Matriz Plena (MP)
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)
Norma técnica brasileira (NBR)
Peróxido de metil-etil-cetona (MEK-P)
Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)
Porcentagem (%)
Porosidade Aparente (PA)
potencial Hidrogeniônico (pH)

Sem Tratamento alcalino (ST)

Sólidos Solúveis Totais (SST)

Tonelada (t)

Tratada com 2% de Hidróxido de Sódio (T2%)

Tratada com 5% de Hidróxido de Sódio (T5%)

Universidade Federal do Pará (UFPA)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Justificativa e Motivação	18
1.2	Objetivos	19
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos Específicos.....	19
1.3	Síntese do Trabalho.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Materiais Compósitos	21
2.2	Matrizes Poliméricas	22
2.2.1	Resina Poliéster	23
2.3	Compósitos Reforçados com Fibras	25
2.3.1	Fibras Naturais.....	26
2.3.2	Fibras Vegetais	28
2.4	Bagaço de Cana-de-Açúcar	32
2.5	Tratamentos Superficiais para as Fibras Vegetais.....	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1	Materiais	41
3.1.1	Matriz Polimérica	41
3.1.2	Aquisição do Bagaço de Cana-de-Açúcar	42
3.2	Métodos	43
3.2.1	Determinação dos Sólidos Solúveis Totais.....	43
3.2.2	Preparo do Bagaço da Cana-de-Açúcar	44
3.2.3	Tratamento Alcalino	44
3.2.4	Determinação da Massa Específica.....	45
3.2.5	Morfologia das Fibras	46

3.3	Confecção dos Compósitos	47
3.4	Caracterização dos Compósitos	50
3.4.1	Ensaio Físicos.....	50
3.4.2	Ensaio de Tração.....	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
4.1	Determinação dos Sólidos Solúveis Totais	52
4.2	Determinação da Massa Específica.....	53
4.3	Morfologia das Fibras	53
4.4	Viabilidade de Confecção	57
4.5	Ensaio Físicos.....	58
4.6	Ensaio de Tração	60
5	CONCLUSÃO	68
5.1	Considerações finais	68
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	69
	REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, há um aumento significativo de indivíduos que demonstram preocupação com a preservação do meio ambiente. Esse público tende a optar por produtos ecologicamente corretos, os quais são produzidos a partir de matérias-primas e processos que causam menor impacto ambiental, apresentam maior eficiência energética e geram menos resíduos (FIA, 2021). Como resultado dessa demanda crescente, os pesquisadores têm se dedicado cada vez mais ao estudo de materiais compósitos que utilizam fibras naturais ou são considerados verdes (MARGEM *et al*, 2017).

Segundo Callister Junior e Rethwisch (2020), os cientistas e engenheiros combinam diversos materiais como metais, cerâmicas, e polímeros para produzir novos materiais. A maioria dos materiais compósitos são desenvolvidos para melhorar combinações de características mecânicas como rigidez, tenacidade e resistência às condições do ambiente e a elevadas temperaturas. De acordo com Levy Neto e Pardini (2016), é comum que os compósitos sejam compostos por duas fases distintas: a matriz e a fase dispersa. A matriz é contínua e envolve a fase dispersa. As propriedades dos compósitos são influenciadas pelas propriedades das fases constituintes, pela sua quantidade relativa e pela geometria da fase dispersa.

O Brasil ocupa a posição de maior produtor e exportador de cana-de-açúcar no mundo. Somente em 2022, foram cultivados mais de oito milhões de hectares, resultando em uma produção superior a 480 milhões de toneladas de cana. No entanto, é importante ressaltar que o cultivo da cana-de-açúcar é considerado uma das atividades que contribuem para o desequilíbrio ecológico no ambiente agrícola. Um dos principais resíduos agroindustriais do país é o bagaço da cana-de-açúcar (EMBRAPA, 2022).

A utilização do bagaço de cana-de-açúcar corrobora com o avanço da sustentabilidade, em que os aspectos de matérias primas de fontes renováveis e a ação ambiental são contemplados. O reaproveitamento deste resíduo agroindustrial é necessário, seu uso remove este resíduo do meio ambiente e gera um novo ciclo de vida (LAZARINI, 2020).

As propriedades de compósitos poliméricos, reforçados com fibras naturais, dependem da adesão fibra com a matriz polimérica, volume de fração de fibra, orientação da fibra e matriz usada. O uso de fibras naturais rígidas na matriz

polimérica flexível proporciona a obtenção de um novo material que pode ter melhores propriedades quando comparado ao polímero puro (KARIMAH *et al*, 2019).

Este trabalho busca realizar a fabricação de um material compósito utilizando as fibras do bagaço de cana-de-açúcar, tratadas em meio alcalino para serem utilizadas como reforço em uma matriz poliéster e seguidamente realizar a caracterização do compósito por meio dos ensaios físico-mecânicos.

1.1 Justificativa e Motivação

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, mais de 8 milhões de hectares são destinados para este cultivo, isso se deve principalmente para a obtenção do álcool combustível, esse álcool é resultado da busca por combustíveis renováveis que possam substituir o petróleo e que cause poucos danos ao meio ambiente, por conta disto a cana-de-açúcar vem tendo uma crescente importância mundial na busca por sustentabilidade (EMBRAPA, 2022).

Contudo, essa produção gera um grande impacto ao meio ambiente já que, uma das práticas comuns nos canaviais é a queima da palha da cana-de-açúcar para facilitar a operação de colheita, essa queima causa a emissão de gases do efeito estufa na atmosfera além da poluição do ar devido a fumaça e fuligem ambas causam transtornos à população (GURGEL *et al*, 2022).

Atualmente, enfrentamos um desafio significativo em relação à quantidade de resíduos sólidos gerados nas áreas urbanas. Um exemplo disso é o descarte do bagaço de cana-de-açúcar proveniente da comercialização de caldo de cana nas ruas das cidades, o qual tem acarretado diversos problemas. Diante desse contexto, é de suma importância enfatizar a implementação de medidas que visem mitigar a inadequada disposição desse resíduo, fomentando alternativas sustentáveis tanto em termos ambientais, visando à preservação do ecossistema, quanto em aspectos socioeconômicos, como a reutilização de resíduos sólidos urbanos (BARBOSA *et al*, 2022).

Por conta dos expostos acima este trabalho tem como justificativa a preocupação com o meio ambiente, já que o bagaço da cana-de-açúcar é o maior resíduo agroindustrial do Brasil, por isso é muito importante agregar valor a este material, este trabalho busca fazer isto através da criação de material compósito de baixo custo com aproveitamento dos próprios recursos naturais, tentando desta forma

minimizar os impactos ambientais e preservar o meio ambiente através da reciclagem do bagaço da cana-de-açúcar.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Fabricar e caracterizar compósitos poliméricos com fibras naturais do bagaço de cana-de-açúcar, tanto tratadas quanto não tratadas com 2% e 5% de hidróxido de sódio e realizar análises físicas e mecânicas dos compósitos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar o tratamento alcalino nas fibras do bagaço de cana-de-açúcar em duas concentrações 2% e 5% de NaOH;
- Realizar análise morfológica das fibras do bagaço da cana-de-açúcar in natura, tratadas com 2% de NaOH e tratadas com 5% de NaOH;
- Análise da viabilidade de produção de compósitos poliméricos com adição de fibras do bagaço de cana-de-açúcar tratadas e não tratadas com NaOH nas proporções em massa de 1%, 2% e 3%;
- Analisar as propriedades físicas de Massa Específica Aparente (MEA), Porosidade Aparente (PA) e Absorção de Água (AA) nos compósitos fabricados;
- Analisar as propriedades mecânicas dos compósitos fabricados através do ensaio de tração.

1.3 Síntese do Trabalho

Este trabalho busca fabricar e caracterizar compósitos com bagaço de cana-de-açúcar em matrizes poliméricas, explorando materiais sustentáveis e reforçados com fibras naturais.

O tópico 1 introduz o estudo, destacando a importância de materiais alternativos e ecologicamente corretos na indústria. Além disso, estabelece os objetivos gerais de sintetizar e avaliar os compósitos de bagaço de cana-de-açúcar, juntamente com objetivos específicos relacionados à preparação e caracterização desses materiais.

No tópico 2, a revisão bibliográfica abrange conceitos essenciais para o trabalho, começando com uma explicação sobre materiais compósitos em geral. O destaque é dado às matrizes poliméricas e o uso de fibras naturais como reforço em compósitos. O bagaço de cana-de-açúcar é destacado como um material promissor devido às suas características e disponibilidade. Os tratamentos superficiais para fibras vegetais, visando aprimorar a adesão entre as fibras e as matrizes, o que resulta na otimização das propriedades dos compósitos.

No tópico 3, são apresentados os materiais e métodos do estudo. Os materiais utilizados, como o bagaço de cana-de-açúcar e a resina poliéster, são listados. A metodologia experimental é detalhada, cobrindo desde a aquisição do bagaço de cana-de-açúcar até os procedimentos de tratamento alcalino e determinação das propriedades físicas do material.

No tópico 4, são apresentados os resultados e discussões. São exibidas as análises das propriedades físicas e mecânicas dos compósitos, relacionando os efeitos do tratamento alcalino e da adição do bagaço de cana-de-açúcar nas características do material. Gráficos, tabelas são utilizados para ilustrar as conclusões obtidas.

No tópico 5, é apresentada a conclusão, reiterando os resultados e destacando as contribuições do estudo. São feitas considerações finais sobre a previsão dos compósitos de bagaço de cana-de-açúcar como alternativas sustentáveis na indústria de materiais. Além disso, são sugeridos tópicos para futuras pesquisas com o objetivo de aprimorar ainda mais as propriedades e aplicações desses compostos.

As referências bibliográficas são específicas ao final do trabalho para dar crédito às fontes consultadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Compósitos

Atualmente o avanço tecnológico ocorre de maneira veloz algumas aplicações tecnológicas exigem materiais com junções incomuns e com propriedades que não podem ser obtidas por apenas um material. Foi a partir desse tipo de necessidade que surgiu a classe dos materiais compósitos, que apresentam a união de uma matriz e uma ou mais fases de reforços e tem como finalidade a obtenção de um terceiro produto, que atenda as características necessárias pelo fabricante (ROCHA, 2020).

Callister Junior e Rethwisch (2020), classificam os materiais compósitos como um material multifásico fabricado artificialmente em contraste com um material que ocorre ou é formado naturalmente. Onde as fases constituintes deste material na maioria das vezes são quimicamente distintas e devem estar separadas por uma interface diferente.

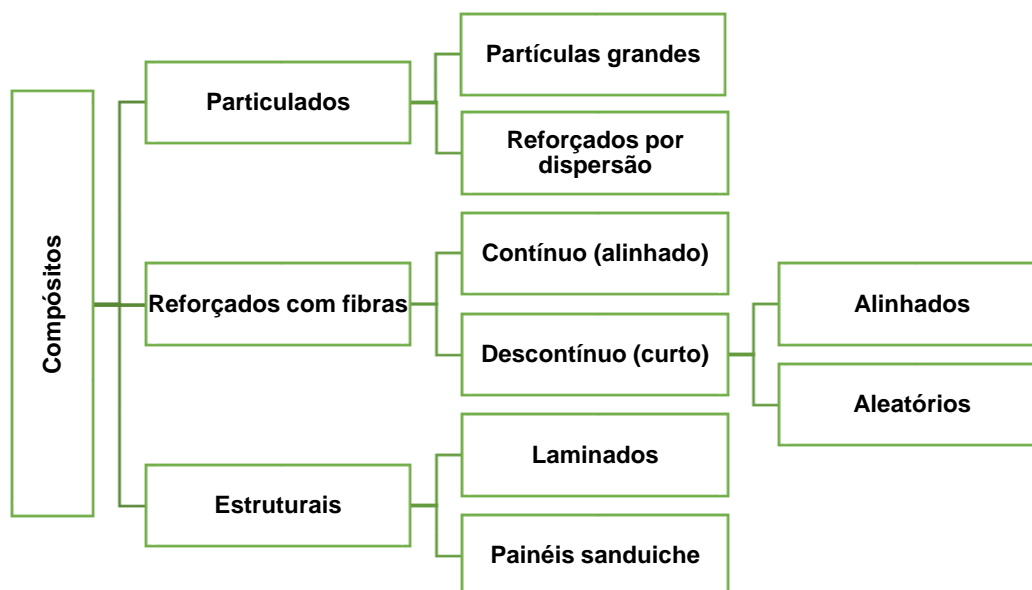
As matrizes podem ser divididas conforme a sua estrutura e natureza química como matrizes poliméricas, cerâmicas, carbono e metálicas. A matriz é responsável por distribuir ou transferir carregamentos ou tensões aplicadas no compósito, a escolha da matriz vai depender da aplicação, destino e processo de obtenção (LEVY NETO; PARDINI, 2016).

A fase de reforço de um compósito tem a responsabilidade de firmar uma alta resistência aos esforços mecânicos, geralmente são constituídos por materiais fibrosos, particulados ou estruturais. Os reforços particulados são na sua maioria partículas grandes, assim como o concreto. Já os estruturais são divididos em laminados e sanduíches (ROCHA, 2020).

Nos compósitos a inserção de partículas geralmente apresentam uma resistência menor do que os reforçados por fibras, contudo seu uso compensa por conta do baixo custo, o limite para a inserção de enchimento é de cerca de 70 % em volume, pois, se a quantidade de matriz for insuficiente para suportar precisamente o material as propriedades deste material serão comprometidas (CAMPBELL, 2010).

A Figura 1 ilustra de forma simples um esquema com a classificação dos materiais compósitos.

Figura 1 - Esquema de classificação de diversos tipos de compósitos.



Fonte: Adaptado de Callister Junior; Rethwisch, 2020.

2.2 Matrizes Poliméricas

A matriz de um compósito pode ser metálica, cerâmica ou poliméricas. As matrizes poliméricas, em particular, têm a vantagem geral de apresentar ductilidade desejável e alta massa molar, além de determinarem a temperatura máxima de trabalho do compósito. Devido à sua versatilidade de formulação e baixo custo em comparação com as outras matrizes, as matrizes poliméricas são amplamente utilizadas na indústria (LEVY NETO; PARDINI, 2016).

A matriz de um material compósito desempenha variáveis funções essenciais. Ela sustenta as fibras, mantendo-as nas posições adequadas, e transfere a carga para as fibras mais resistentes. Além disso, a matriz protege as fibras contra danos durante a fabricação e o uso do compósito, evitando a propagação de rachaduras ao longo dele. A matriz também tem influência significativa sobre as propriedades elétricas, comportamento químico e resistência a altas temperaturas do compósito (ASKELAND; WRIGHT, 2019).

As matrizes poliméricas podem ser termorrígidas ou termoplásticas. A distinção fundamental entre eles reside no comportamento em temperaturas elevadas. Enquanto os termoplásticos se tornam fluidos acima de uma determinada

temperatura, os termorrígidos se degradam quando aquecidos, sem passar pela fase fluida (GOMES, 2019).

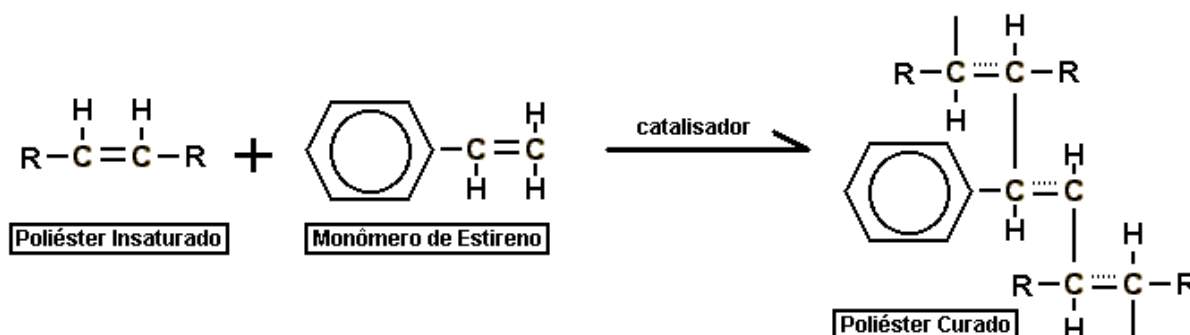
As matrizes termorrígidas são caracterizadas por não serem moldáveis após o processo de polimerização, uma vez que a temperatura não afeta sua viscosidade de forma a permitir a moldagem. Exemplos de matrizes termorrígidas incluem resinas fenólicas, epóxi e poliéster (SILVA, 2022).

A matriz termoplástica tem diversas vantagens em relação às matrizes termofixas. Entre essas vantagens, destaca-se a maior facilidade de reciclagem, junto com a capacidade de serem moldados novamente de acordo com as necessidades e de serem submetidos a tratamentos específicos. Essas características permitem que os materiais atendam às preocupações ambientais. Na realidade, eles possuem a capacidade de serem fundidos e moldados novamente por meio de aquecimento, possibilitando a remodelagem do compósito (MURRAY, 2021).

2.2.1 Resina Poliéster

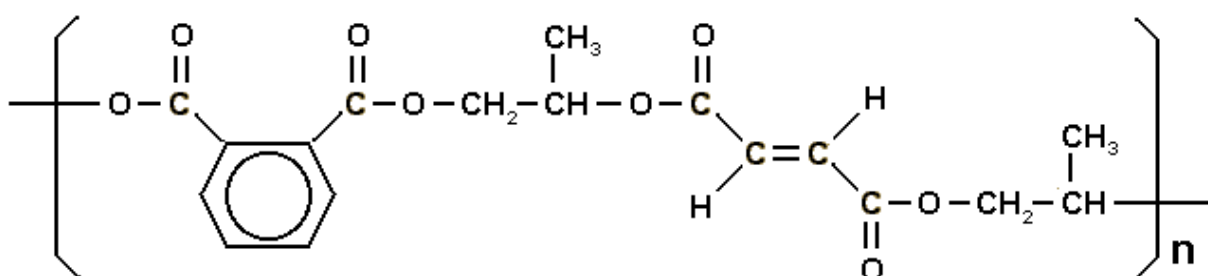
Os polímeros que constituem as resinas de poliéster são formados principalmente pela reação entre álcoois e ácidos polifuncionais. A estrutura do poliéster insaturado é tipicamente composta por três componentes fundamentais: ácidos saturados, ácidos insaturados e glicóis. Os ácidos insaturados fornecem sítios reativos que possibilitam a formação de ligações químicas durante o processo de cura. O ácido saturado é responsável pelo espaçamento das cadeias poliméricas, enquanto o glicol favorece a reação de esterificação, promovendo a ligação dos ácidos para formar o polímero (FORNARI JUNIOR, 2017). A Figura 2 apresenta a reação química do processo de cura do poliéster insaturado.

Figura 2 - Processo de cura do poliéster insaturado.



A resina poliéster ortoftálica é composta por ácidos modificadores, como o ácido ftálico ou seu anidrido. Em comparação com outras resinas, apresenta propriedades químicas e mecânicas inferiores devido à dificuldade de obtenção de polímeros de alto peso molecular. O anidrido ftálico tem a tendência de se regenerar a partir dos ésteres do ácido ftálico, resultando em um aumento na presença de espécies de baixo peso molecular, as quais são sensíveis a ataques químicos (SAKAMOTO, 2018). A Figura 3 apresenta a cadeia molecular da resina poliéster ortoftálica.

Figura 3 - Resina poliéster ortoftálica.



Fonte: Sakamoto, 2018.

A resina poliéster é uma das mais utilizadas na produção de um compósito polimérico, pois esta resina confere ao material um bom desempenho mecânico e custo mais acessível que a resina epóxi ou éster-vinílica. A resina poliéster detêm diferentes propriedades, que a personaliza como a mais polivalente dentre todas as resinas termofixas (OLIVEIRA; MACHADO, 2022).

As principais propriedades da resina poliéster são:

- Excelente estabilidade dimensional;
- Excelente resistência a ambientes quimicamente agressivos;
- Ótimas propriedades elétricas e isolante;
- Fácil pigmentação;
- Não liberação de materiais voláteis durante a cura (sem estireno);
- Cura a frio;
- Permite a utilização de moldes simples e barato.

2.3 Compósitos Reforçados com Fibras

Compósitos reforçados com fibras oferecem maior resistência, resistência à fadiga e relação resistência/peso. Eles combinam fibras fortes e rígidas com uma matriz mais macia e dúctil. A matriz transfere a carga para as fibras, que absorvem a maior parte da força aplicada. Além disso, a matriz protege as fibras e minimiza a difusão de substâncias prejudiciais. Esses compósitos são altamente resistentes em diferentes temperaturas (ASKELAND; WRIGHT, 2019).

Pereira (2018), afirma que as fibras de reforço desempenham um papel fundamental nos compósitos reforçados por fibras, proporcionando uma resistência e rigidez significativas à matriz, juntamente com outras propriedades desejáveis, como resistência à alta temperatura e ao fogo. A matriz, por sua vez, é composta por um material geralmente menos denso e mais dúctil do que as fibras. Sua função principal é unir as fibras, mantendo-as na posição adequada, transferindo as cargas para elas e protegendo-as contra degradação durante a fabricação e utilização dos compósitos. Além disso, a matriz também atua na prevenção da propagação de trincas nas fibras pelo compósito.

Segundo Callister Junior e Rethwisch (2020), diversos fatores relacionados ao reforço têm influência nas propriedades dos materiais compósitos, como a geometria, tamanho, distribuição, orientação e fração volumétrica. No caso de compósitos reforçados com fibras, é importante garantir que o comprimento das fibras seja igual ou maior que um valor crítico conhecido como comprimento crítico (l_c - *Critical length*) da fibra para alcançar níveis máximos de tensão na fibra. Outro fator relevante é a razão de aspecto (l/d - *length / diameter*). Fibras longas, com uma relação ($l/d > 100$), conseguem suportar a maior parte das cargas mecânicas na interface.

Lazarini (2020), comenta sobre a orientação das fibras na matriz pois, elas também desempenham um papel significativo em processos que envolvem fluxo, como injeção e extrusão, as fibras tendem a se alinhar, resultando em propriedades mecânicas maiores na direção da orientação das fibras. Isso leva à formação de um material anisotrópico. Portanto, espera-se que compósitos com fibras contínuas unidirecionais apresentem propriedades mecânicas superiores na direção paralela às fibras, em comparação com compósitos com fibras curtas dispostas aleatoriamente, os quais são considerados materiais isotrópicos.

Callister Junior e Rethwisch (2020), classificam os compósitos de acordo com a orientação e o comprimento das fibras na matriz, fatores que influenciam nas propriedades mecânicas do material. As fibras podem ser orientadas das seguintes formas:

a) As fibras contínuas unidirecional no compósito são dispostas na direção longitudinal, resultando em propriedades mecânicas altamente anisotrópicas. Essas fibras adquirem um caráter direcional, onde o reforço e a resistência são maximizados na direção do alinhamento.

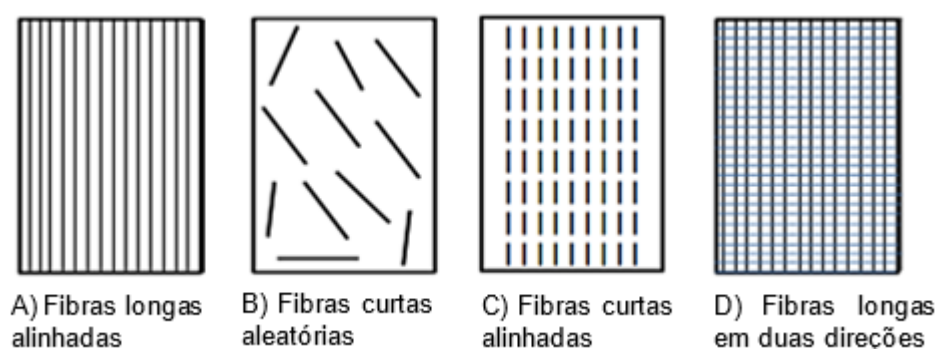
b) As fibras contínuas multidirecionais proporcionam resistência e rigidez de forma equilibrada em todas as direções. Isso as torna adequadas para aplicações que exigem propriedades mecânicas uniformes em todas as direções.

c) As fibras descontínuas e unidirecional, quando dispostas na direção longitudinal dos compósitos, proporcionam resistência e rigidez significativas.

d) As fibras descontínuas aleatória, quando incorporadas de forma aleatória na matriz, resultam em propriedades isotrópicas. No entanto, essa disposição também apresenta algumas limitações em termos de eficiência do reforço.

A Figura 4 apresenta as principais disposições das fibras em um material compósito.

Figura 4 - Diferentes disposições de fibras para a produção de compósitos.



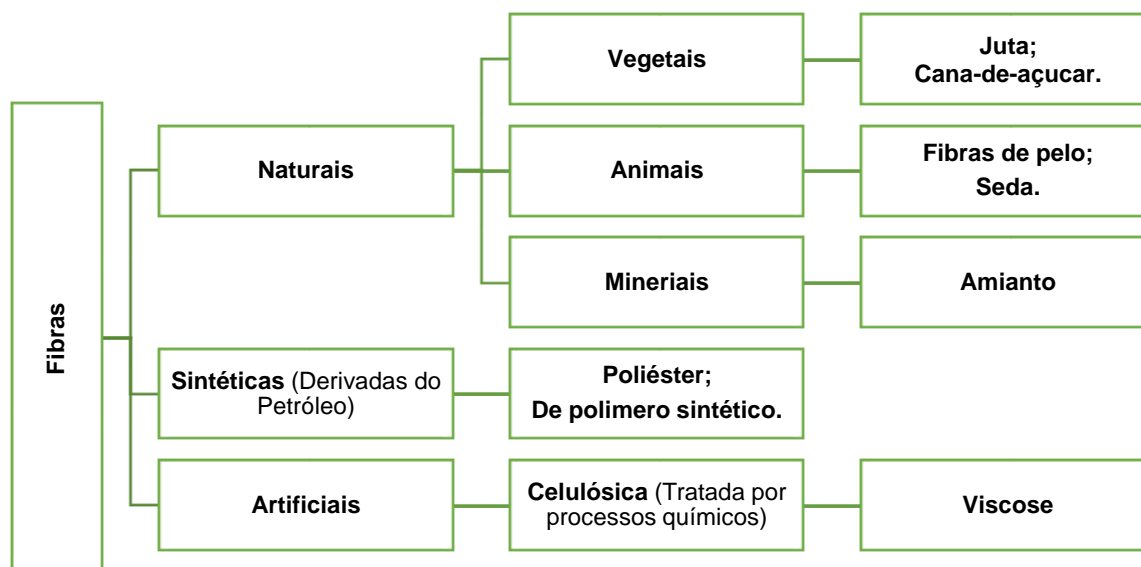
Fonte: Adaptado de Pereira, 2016.

2.3.1 Fibras Naturais

As fibras naturais são fontes renováveis utilizadas como reforços a fim de substituir materiais à base de petróleo e fibras sintéticas. As fibras naturais são

classificadas de acordo com sua origem, se são provenientes de plantas, animais ou minerais (LOTFI, 2021). A Figura 5 apresenta a classificação das fibras em naturais, sintéticas e artificiais.

Figura 5 - Esquema de classificação das fibras.



Fonte: Adaptado de Gomes; Costa; Mohallem, 2016.

As fibras artificiais que são produzidas no Brasil, derivam da celulose encontrada na pasta de madeira ou de fibras curtas restantes na semente de algodão. nesta celulose é feito um tratamento químico com diversos produtos que dependem do fio que se deseja produzir (GOMES; COSTA; MOHALLEM, 2016).

As fibras sintéticas são produzidas em laboratório a partir do petróleo e do gás natural, pois elas derivam de polímeros não existentes na natureza, dentre esses polímeros temos o nylon, acrílico, poliuretanos, polietileno, e muitos outros. Todos os anos milhões de toneladas destas fibras são produzidas, as fibras sintéticas mais utilizadas nos materiais compósitos são as fibras de carbono, de vidro e aramida (LEITE, 2017).

As fibras naturais se dividem em vegetal, animal ou mineral. As fibras de origem animal possuem proteínas. As fibras de origem vegetal possuem celulose (polissacarídeo) e são conhecidas como fibras lignocelulósicas, estas fibras possuem um número muito grande de estudos, por conta da sua alta disponibilidade no meio ambiente e crescimento acelerado quando comparado com outras (LOFTI *et al.* 2021).

O Quadro 1 apresenta as vantagens e desvantagens da utilização de fibras naturais em relação às fibras sintéticas, como material de reforço em um compósito.

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens das fibras naturais como reforço.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Biodegradabilidade	Qualidade varia em função de fatores imprevisíveis, tais como clima
Menor peso específico resultando em maior resistência mecânica e rigidez específicas	Absorção de umidade que causa transpiração das fibras
Fonte renovável	Temperatura de processamento máxima limitada
Baixo custo de produção	Menores propriedades de resistência, em particular, resistência ao impacto
Processamento amigável, com degradação reduzida de ferramentas	Menor durabilidade
Melhores condições de trabalho e sem irritação da pele	Pouca resistência à chama
Boas propriedades de isolamento acústico e térmico	Flutuações de preço de acordo com resultados de colheitas e políticas agrárias

Fonte: Adaptado de Pereira, 2018.

2.3.2 Fibras Vegetais

As fibras vegetais, também chamadas de fibras lignocelulósicas, possuem diferentes classificações, dependendo da espécie de planta e da região da qual são extraídas (como folhas, frutos, caules, entre outras partes). Essas fibras são constituídas principalmente por três componentes principais: celulose, hemicelulose e lignina, a interação complexa entre esses componentes confere às fibras vegetais propriedades físicas e químicas únicas, tornando-as valiosas para diversas aplicações industriais e tecnológicas (LAZARINI, 2020).

A Tabela 1 apresenta as principais fontes de extração de fibras lignocelulósicas, com destaque para o coco, algodão, juta, abacaxi, rami e sisal, que são amplamente utilizadas no Brasil.

Tabela 1 - Composição química de diversas fibras lignocelulósicas.

Fibra	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Algodão	83	6	0 – 2
Juta	61 – 72	17 – 20	12 – 13
Banana	60 – 65	19	5 – 10
Rami	69 – 76	13 – 17	0 – 1
Sisal	66 – 75	10 – 14	7 – 9
Bambu	74	13	10
Linho	64 – 71	16 – 21	2
Bagaço da cana	32 – 55	17 – 32	19 – 25
Arroz	32 – 47	19 – 27	5 – 24
Palha de trigo	28 – 39	23 – 24	16 – 25

Fonte: Adaptado de Souza, 2021.

A hemicelulose tem como função conectar e regular a distância entre as fibras rígidas, permitindo flexibilidade nos espaços entre as estruturas mais compactas. A região da hemicelulose, localizada entre as fibras menores, é predominantemente desorganizada. Macroscopicamente, a hemicelulose tem a função de distanciar e posicionar as longas estruturas que fornecem resistência mecânica à planta. A condição desorganizada da hemicelulose permite maior liberdade de posicionamento e flexibilidade para absorver tensões (FORNARI JUNIOR, 2017).

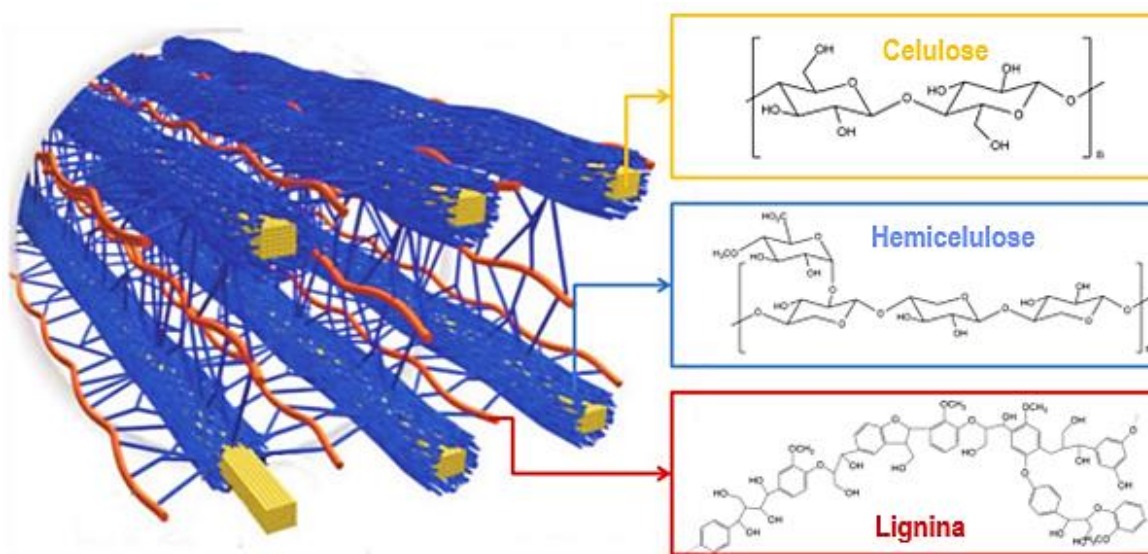
A celulose é o componente principal das fibras lignocelulósicas, fornecendo resistência e estabilidade para as paredes celulares e para a fibra como um todo. Trata-se de um polímero linear composto por ligações β - 1,4 - glicosídicas, sendo o componente mais abundante nas fibras vegetais. As hidroxilas presentes em sua estrutura formam ligações de hidrogênio tanto entre as moléculas quanto dentro delas. Essa estrutura cristalina da celulose resulta em sua insolubilidade em certos solventes orgânicos e na água (PEREIRA, 2016).

A lignina é um polímero presente nas plantas que desempenha um papel estrutural importante. É composta pela p-hidroxifenila, siringila e guaiacila, que se organizam tridimensionalmente. A lignina preenche os espaços entre as microfibras celulósicas, ajudando a manter a estrutura e corrigir pequenas irregularidades. Ela atua como uma barreira de proteção, endurecendo as paredes celulares e protegendo

a celulose contra fungos e bactérias. Além disso, a lignina possui características químicas que lhe conferem resistência mecânica e boa resistência microbiológica (FORNARI JUNIOR, 2017).

A Figura 6 apresenta o esquema representativo da estrutura das fibras lignocelulósicas.

Figura 6 - Ilustração da estrutura das fibras lignocelulósicas.



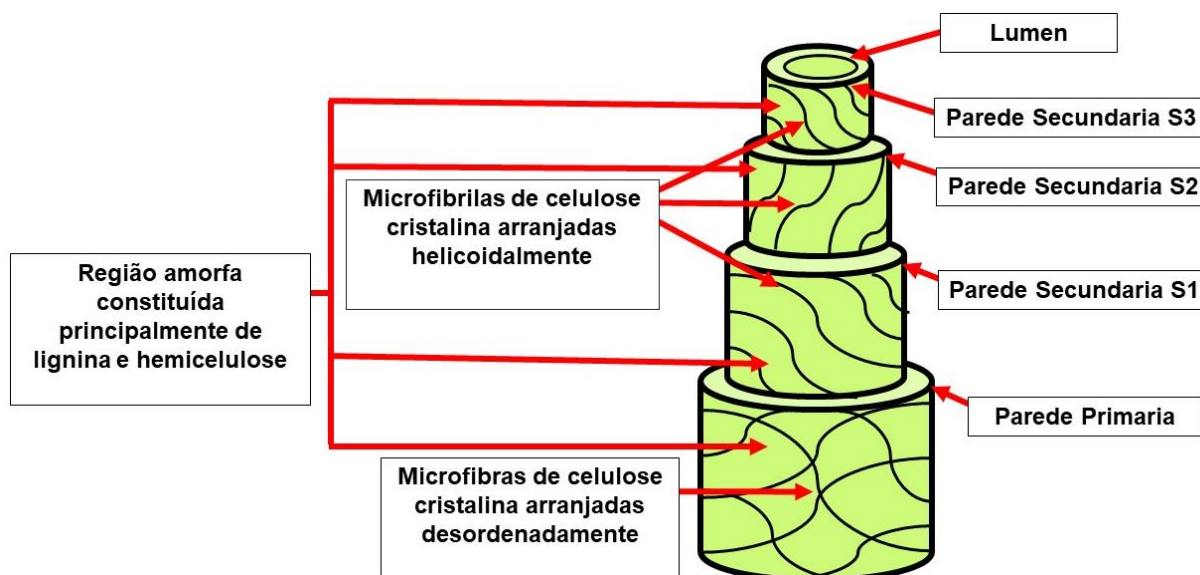
Fonte: Adaptado de Santos, 2020.

As paredes celulares são compostas por diferentes proporções e arranjos de celulose, hemicelulose e lignina, que as distinguem umas das outras. Elas são formadas por camadas de microfibrilas que crescem em formato de espiral, com orientações angulares diversas, e são classificadas em parede celular primária e parede celular secundária (OLIVEIRA, 2018).

A parede celular primária é composta por uma rede irregular de microfibrilas de celulose envoltas por uma matriz de hemicelulose. No entanto, essa parede apresenta porosidade e características indesejáveis, como baixa resistência à água. Por outro lado, a parede celular secundária é subdividida em três camadas (S1, S2 e S3), sendo a camada S2 a mais significativa e responsável pelas propriedades das fibras. Nessa camada, as microfibrilas estão aproximadamente paralelas entre si e inclinadas em relação ao eixo longitudinal da fibra, com o ângulo de orientação variando entre diferentes plantas (SANTOS, 2020).

A Figura 7 apresenta de forma esquemática as estruturas das paredes celulares, bem como a disposição das microfibrilas em uma fibra vegetal.

Figura 7 - Componentes estruturais das paredes celulares e orientação.



Fonte: Adaptado de Oliveira, 2018.

Os extrativos são compostos orgânicos, como terpenóides, ácidos graxos, flavonóides, esteróides e outros compostos aromáticos, que não estão presentes na parede celular lignocelulósicas. Esses compostos podem ser facilmente extraídos por meio de água, solventes orgânicos neutros ou vaporização. Sua presença varia entre diferentes espécies vegetais e é encontrada em cascas, folhas, frutos e sementes em quantidades geralmente maiores do que nas fibras. Altas concentrações de extrativos podem ter um impacto negativo na cura de compostos poliméricos, por isso é importante quantificá-los e realizar a extração de forma adequada (PEREIRA, 2016).

A utilização das fibras lignocelulósicas como reforço em compósitos tem recebido crescente reconhecimento em diversas áreas de aplicação, incluindo indústrias automotivas e de embalagens. Esses materiais compósitos apresentam vantagens como boas propriedades mecânicas, custo reduzido, alta resistência específica, facilidade de fabricação, capacidade de biodegradação e rigidez estrutural satisfatória. Essas características tornam esses materiais adequados para uma ampla gama de aplicações (TITA *et al*, 2018).

No Brasil, as fibras mais comumente empregadas no desenvolvimento de materiais compósitos incluem o bagaço de cana-de-açúcar, bambu, arroz e palha de trigo. O bagaço de cana-de-açúcar, em particular, destaca-se devido à sua ampla produção e ao volume significativo de resíduos gerados (SOUZA, 2021).

2.4 Bagaço de Cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar possui o nome científico de *Saccharum officinarum*, ela é uma gramínea pertencente à classe das monocotiledôneas. Originária da Ásia, foi introduzida no Brasil durante o período colonial e tem sido cultivada extensivamente nas regiões tropicais e subtropicais do país desde o século XVI (LAZARINI, 2020). A Figura 8 apresenta um canavial brasileiro, como é chamada a plantação de cana-de-açúcar.

Figura 8 - Cultivo de cana-de-açúcar.



Fonte: CHBAGRO, 2021.

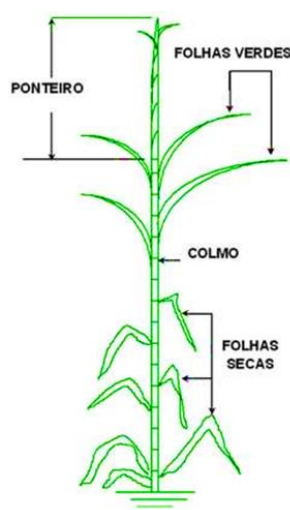
Praticamente todos os subprodutos gerados pela colheita da cana-de-açúcar podem ser reaproveitados. O maior subproduto gerado por esta atividade é o bagaço da cana-de-açúcar sendo este um resíduo fibroso proveniente da extração do caldo pelas moendas (EMBRAPA, 2022).

O bagaço de cana-de-açúcar é composto por polissacarídeos, principalmente celulose (31-54%) e hemicelulose (13-39%), além de lignina (11-27%). Em menor proporção, encontram-se cinzas (1-6%) e extrativos (2-25%). É fundamental verificar

a composição específica de cada tipo de bagaço de cana, uma vez que ela terá impactos distintos dependendo da aplicação desse resíduo (MIRANDA *et al*, 2021).

Na Figura 9 é possível observar a representação esquemática da estrutura de uma cana-de-açúcar.

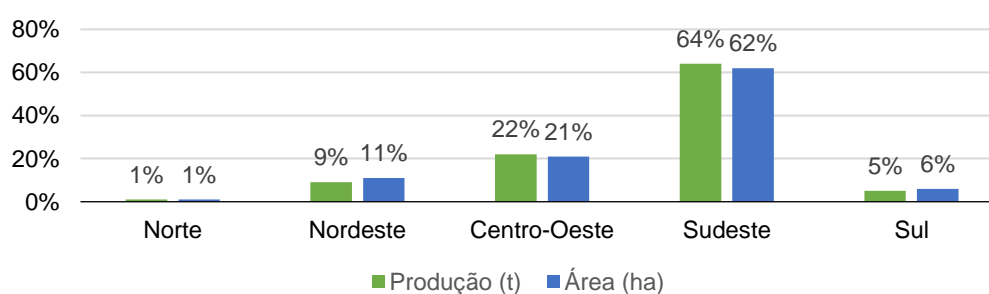
Figura 9 - Representação esquemática da estrutura da Cana-de-Açúcar.



Fonte: Adaptado de Oliveira, 2018.

O cultivo de cana no Brasil supera 637 milhões de toneladas, as regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste concentram as maiores produções impulsionando a economia do país e contribuindo significativamente para o mercado global de açúcar e etanol. O estado do Pará produziu cerca de 15 toneladas da cana-de-açúcar entre a safra de 2022/2023 ficando entre os estados brasileiros que possuem o menor cultivo da cana-de-açúcar (CONAB, 2023). A Figura 10 apresenta um gráfico sobre a produção regional e a área plantada de cana-de-açúcar no Brasil. A produção é mensurada em mil toneladas (t) e a área plantada em mil hectares (ha).

Figura 10 - Comparativo de área e produção regional da cana-de-açúcar.



Fonte: Adaptado de CONAB, 2023.

A cidade de Igarapé-Açu fica localizada no nordeste paraense, possui uma área plantada de 15 hectares com capacidade de produção de cerca de 900 toneladas de cana-de-açúcar por ano, com essa produção a cidade fica em 5º lugar no ranking das cidades com maior produção de cana-de-açúcar do estado do Pará (IBGE, 2022).

O cultivo da cana-de-açúcar gera uma quantidade significativa de resíduos sólidos e líquidos ao longo da cadeia de produção. Cerca de 69% dos resíduos totais da agroindústria são provenientes da produção de cana-de-açúcar. A cada mil quilos de cana utilizados para a produção de álcool, aproximadamente 280 kg de bagaço e palha são gerados como resíduos. Geralmente ocorre a queima do bagaço da cana de açúcar para a geração de energia. Historicamente, o descarte inadequado desses resíduos tem causado danos ao meio ambiente, especialmente quando despejados em corpos d'água (CRUZ *et al*, 2021).

Para enfrentar esse desafio, governos e entidades têm implementado legislações e normas, como a Norma Brasileira Registrada - NBR 10004/2004 no Brasil, que visam regular o tratamento adequado dos resíduos sólidos. Esta norma define os resíduos como:

“Resíduos nos estados sólido e semissólido, aqueles que resultam de atividades de origem: industrial, domiciliar, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos, cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004, p.1).”

Outra regulamentação utilizada para controlar o tratamento adequado de resíduos sólidos é a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que fundamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS que define os resíduos sólidos como:

“Resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem resultante de atividade humana em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviável em face da melhor tecnologia disponível (PNRS, 2010, p.11).”

Quando o bagaço de cana-de-açúcar é descartado de maneira inadequada, pode se tornar um poluente ambiental, resultando em problemas como a poluição de águas, formação de poeira, odores desagradáveis e até mesmo riscos de ignição espontânea (SANTOS, 2020). Atualmente, esse resíduo é valorizado nas usinas de açúcar e álcool, sendo utilizado como combustível para gerar vapor, que é empregado

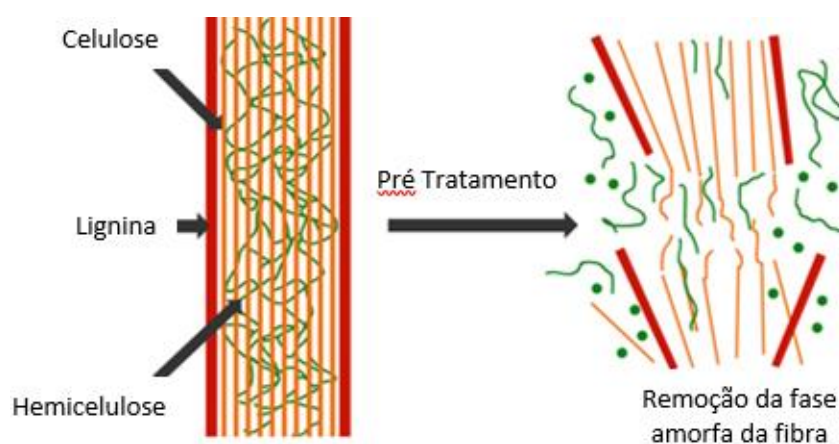
nos processos produtivos e na geração de energia elétrica. Além disso, o bagaço de cana-de-açúcar também é aplicado como fertilizante nas plantações da própria cana, buscando um aproveitamento sustentável desse recurso (XU *et al*, 2018).

2.5 Tratamentos Superficiais para as Fibras Vegetais

O tratamento prévio das fibras envolve a etapa de deslignificação e remoção da lignina, seguida pela degradação das hemiceluloses. Essa etapa tem como principais objetivos melhorar a compatibilidade entre a fibra e a matriz polimérica, bem como aumentar a relação entre comprimento e diâmetro das fibras. Essas modificações, por sua vez, resultam em melhorias nas propriedades mecânicas e/ou térmicas do compósito final (SOUZA, 2021). Em diversos estudos, procedimentos prévios de tratamento das fibras vegetais são realizados utilizando agentes modificadores adequados, o que promove um aumento na molhabilidade das fibras pela matriz. Esse processo resulta em uma melhora na dispersão e nas propriedades mecânicas (LAZARINI, 2020).

Com o tratamento prévio das fibras ocorre uma redução na densidade e rigidez da região interfibrilar devido à remoção da hemicelulose. Isso possibilita um rearranjo das fibrilas na direção da deformação mecânica. Como resultado, a carga suportada em resposta a esforço mecânico, por exemplo, será distribuída de maneira mais eficiente (SANTOS, 2020). A Figura 11 representa esquematicamente este processo.

Figura 11 - Pré tratamento de fibras lignocelulósicas.



Fonte: Adaptado de Haq *et al.*, 2021.

Assim, um tratamento prévio eficaz resultará em uma maior exposição da superfície interna da fibra e na modificação da sua cristalinidade. Além disso, haverá um aumento na acessibilidade à celulose, a quebra das ligações de hidrogênio entre as fibras e, conseqüentemente, um aumento na sua reatividade (PRADO; JACINTO; SPINACÉ, 2020).

De acordo com Gallos *et al.* (2017), existem três tipos de tratamentos para fibras: físicos, biológicos e mecânicos. Os tratamentos químicos são aplicados diretamente à superfície das fibras e são frequentemente utilizados para remover componentes não celulósicos presentes na superfície das fibras. Alguns procedimentos químicos visam o enxerto de moléculas, como cadeias hidrofílicas, cadeias hidrofóbicas, monômeros ou polímeros, na superfície das fibras de celulose. Existem diversas opções de tratamentos disponíveis, cada uma com características distintas, incluindo:

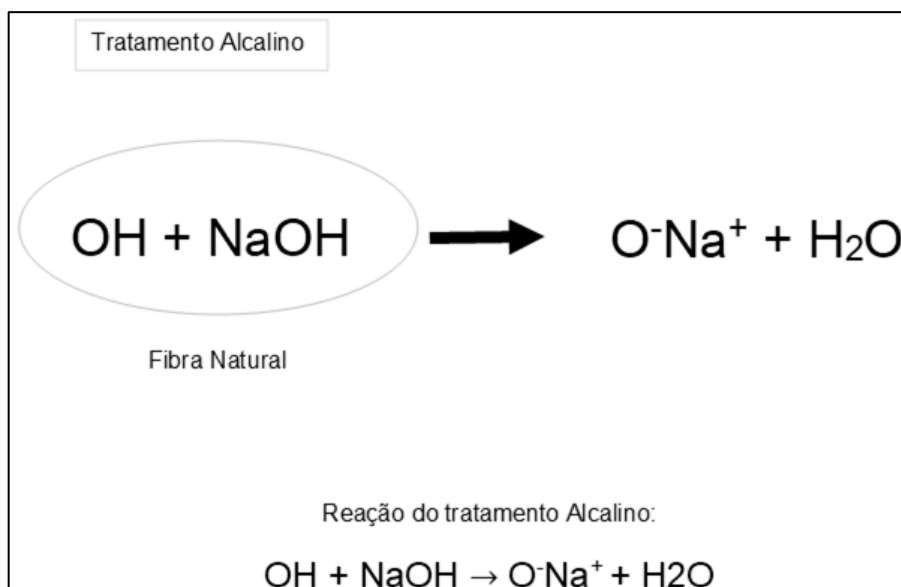
- Químico (alcalino, silano, anidrido maleico, anidrido acético);
- Física (irradiação, plasma, corona, térmica);
- Mecânica (extrusão, cardagem, corte);
- Biológico (enzimático, maceração);
- Uma mistura de pré-tratamentos químicos, físicos, mecânicos ou biológicos (térmico e químico, extrusão reativa).

Os materiais lignocelulósicos são abundantes e renováveis, mas têm propriedades de molhabilidade, aderência e resistência à degradação limitadas. A modificação da superfície desses materiais pode melhorar essas propriedades, tornando-os mais adequados para uso em uma ampla gama de aplicações. Os tratamentos químicos, físicos e biológicos podem ser usados para modificar a superfície dos materiais lignocelulósicos. Os tratamentos químicos podem enxertar grupos funcionais à superfície da fibra, o que melhora sua molhabilidade e aderência. Os tratamentos físicos podem alterar a rugosidade da superfície da fibra, o que também melhora sua molhabilidade e aderência. Os tratamentos biológicos podem usar microrganismos para modificar a superfície da fibra, o que pode melhorar sua resistência à degradação (FORNARI JUNIOR, 2017).

O tratamento alcalino também conhecido como mercerização, é um método no qual as fibras são submetidas a um tratamento utilizando uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), o qual promove a limpeza da superfície da fibra e a remoção parcial dos constituintes amorfos solúveis em meio alcalino. Como resultado, ocorre uma redução no grau de agregação das fibras, tornando a superfície mais rugosa (OLIVEIRA, 2018).

A Figura 12 ilustra uma reação química que ocorre durante o tratamento alcalino de uma fibra natural. Esta reação pode ser interpretada pela teoria de Arrhenius de três maneiras principais: A Dissociação Iônica do hidróxido de sódio (NaOH) envolve a separação de seus íons durante a reação. A Energia de Ativação, representa a energia necessária para iniciar essa dissociação. A relação entre Energia de Ativação e Constante de Velocidade destaca que a constante de velocidade de uma reação é afetada pela energia de ativação e pela temperatura (RYE *et al*, 2016).

Figura 12 - Representação esquemática do tratamento da superfície da fibra com NaOH.



Fonte: Adaptado de Oliveira, 2018.

Oliveira (2018), também afirma que o tratamento de mercerização melhora significativamente as propriedades mecânicas e térmicas do compósito. No entanto, é importante controlar a concentração do tratamento, pois um excesso pode levar à designificação excessiva das fibras, resultando em enfraquecimento ou danos às mesmas.

O tratamento superficial da fibra desempenha um papel crucial no processamento, pois reduz a natureza hidrofílica da fibra, melhora a adesão com a matriz e modifica a estrutura morfológica da superfície. Isso resulta em uma maior resistência mecânica dos compósitos (SOUZA, 2021).

Oliveira (2018), apresenta a avaliação das propriedades físicas e mecânicas das fibras de bagaço de cana-de-açúcar *in-natura* e modificadas com NaOH. O objetivo é avaliar a viabilidade do uso dessas fibras como reforço em compósitos poliméricos. A dissertação conclui que as fibras modificadas apresentam melhores propriedades mecânicas e são mais adequadas para uso em compósitos.

El-baky (2019), explora a incorporação de fibras de bagaço de cana-de-açúcar em compósitos de poliéster reforçados com vidro. O objetivo é avaliar o efeito do tratamento alcalino na resistência mecânica dos compósitos. Os compósitos foram preparados usando uma mistura de resina de poliéster, fibra de vidro e bagaço de cana-de-açúcar tratado com NaOH. A proporção da mistura foi variada para obter diferentes concentrações de bagaço (10 - 30% em peso). Os resultados mostraram que o tratamento alcalino melhorou significativamente as propriedades mecânicas dos compósitos. A resistência à tração, o módulo elástico e a dureza aumentaram com o aumento da concentração do bagaço.

Araújo e Martins (2022), avaliaram o desempenho, as propriedades mecânicas e a viabilidade financeira de compósitos híbridos para a produção de telhas poliméricas. A pesquisa envolveu o tratamento das fibras naturais em solução alcalina de NaOH e a produção de compósitos poliméricos no formato de placas por meio do processo de laminação manual. A solução alcalina de NaOH foi utilizada no tratamento das fibras naturais do bagaço de cana-de-açúcar para melhorar a aderência entre as fibras e a matriz polimérica. O tratamento alcalino removeu a lignina e a hemicelulose das fibras, aumentando a porosidade e a área superficial das fibras. Isso resultou em uma melhor aderência entre as fibras e a matriz polimérica, o que melhorou as propriedades mecânicas dos compósitos híbridos de fibra de vidro e fibras naturais do bagaço de cana-de-açúcar. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios térmicos, mecânicos e de absorção de água, que mostraram que os compósitos híbridos absorveram mais energia de impacto e água em comparação com os compósitos feitos apenas com fibra de vidro.

Deepa *et al.* (2020), comenta o uso do bagaço de cana-de-açúcar como reforço em compósitos poliméricos e materiais de construção, destacando o tratamento

alcalino das fibras. O tratamento alcalino remove a lignina e a cera das fibras, aumenta a rugosidade e o número de sítios reativos, mas também reduz o grau de polimerização, o teor de lignina e hemicelulose. O tratamento alcalino melhora as propriedades mecânicas dos compósitos, mas pode enfraquecer as fibras. Outros métodos de tratamento químico também foram usados para modificar as fibras. O bagaço de cana-de-açúcar foi usado em diferentes formas e matrizes, formando compósitos com aplicações potenciais em vários setores.

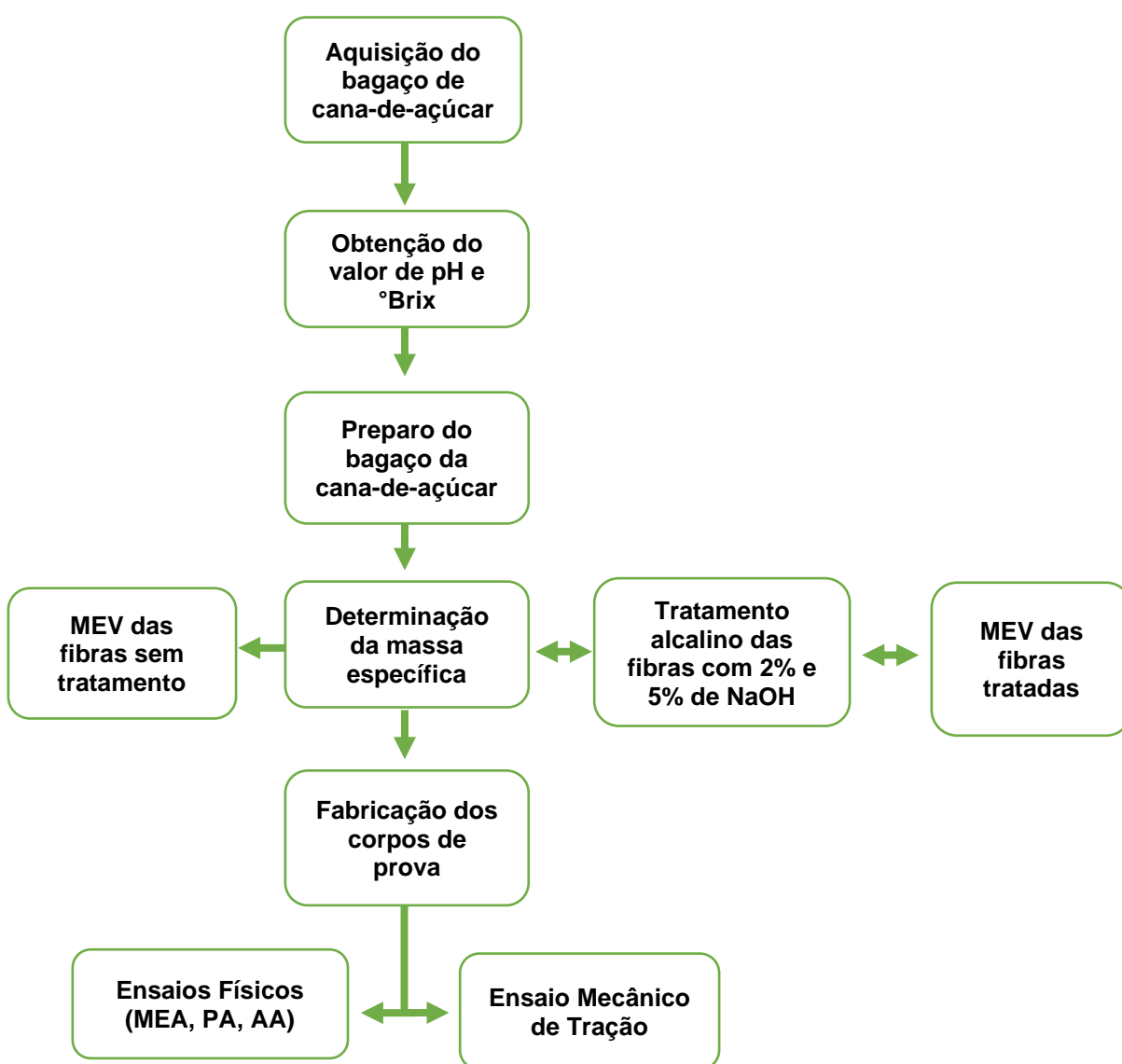
Anggono *et al.* (2019), avaliam como o tratamento alcalino com NaOH e Ca (OH)₂ afeta a estrutura do bagaço de cana-de-açúcar, que é usado como reforço em biocompósitos. Os resultados obtidos mostraram que o tratamento alcalino remove a lignina e a hemicelulose das fibras, aumenta a superfície da celulose, mas também reduz o peso das fibras. O tratamento alcalino melhora a adesão entre as fibras e a matriz polimérica, mas que o uso de Ca (OH)₂ foi mais suave que o NaOH.

Magagula *et al.* (2022), analisou o tratamento alcalino nas propriedades mecânicas das fibras naturais e dos compósitos biopoliméricos. As fibras naturais foram submetidas a tratamento com soluções de hidróxido de sódio (NaOH) em diferentes concentrações e tempos de imersão. Esse tratamento alcalino removeu componentes não celulósicos, como lignina, hemicelulose e cera, aumentando a rugosidade da superfície, o número de grupos hidroxila e a cristalinidade da celulose. Além disso, houve redução no peso molecular, teor de umidade e estabilidade térmica das fibras. A adesão interfacial entre as fibras e as matrizes biopoliméricas foi melhorada, resultando no aprimoramento das propriedades mecânicas dos compósitos. Embora o tratamento alcalino seja eficaz para melhorar as propriedades mecânicas, é crucial otimizá-lo para evitar a degradação das fibras. Em resumo, o tratamento alcalino é um passo significativo para o desenvolvimento de compósitos sustentáveis, melhorando a compatibilidade entre fibras naturais e biopolímeros.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os compósitos foram produzidos no Laboratório de Engenharia Química localizado no bloco de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará – UFPA. A Figura 13 apresenta um fluxograma com as principais etapas de produção dos compósitos, desde a obtenção do bagaço de cana-de-açúcar, as caracterizações dos corpos de prova.

Figura 13 - Fluxograma geral do processo.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2023.

3.1 Materiais

3.1.1 Matriz Polimérica

A matriz polimérica empregada neste estudo foi a resina cristal poliéster ortoftálica insaturada, com densidade variando de 1,10 – 1,20 g/cm³ segundo a ficha do fabricante. O sistema adotado consistiu no uso do acelerador de cobalto (CAT-MET) em uma proporção de 1,5% (v/v), e o iniciador utilizado foi o BUTANOX M-50 – peróxido de metil etil cetona - (MEK-P) na proporção de 1% (v/v).

O Quadro 2 apresenta as principais propriedades da resina poliéster ortoftálica utilizada, conforme informações fornecidas pelo fabricante.

Quadro 2 - Propriedades da Resina Poliéster Ortoftálica.

Propriedade	Unidade	Medida
Massa específica a 25 °C	g/cm ³	1,10 - 1,20
Viscosidade Brookfield a 25 °C	cP	250 - 350
Gel Time a 25 °C	min	10 - 15
Intervalo Simples	min	08 - 12
Pico Exotérmico	°C	160 - 190
Tixotropia	-	Min 1
Teor de Sólidos	%	54-58

Fonte: Adaptado de REDELEASE, 2023.

Na Figura 14 apresenta a imagem ilustrativa da resina poliéster ortoftálica do acelerador de cobalto (CAT-MET) e o iniciador BUTANOX M-50 – peróxido de metil etil cetona - (MEK-P) utilizados neste trabalho.

Figura 14 – Imagem ilustrativa do acelerador de cobalto, resina poliéster e iniciador.



Fonte: REDELEASE; DU LÁTEX, 2023.

3.1.2 Aquisição do Bagaço de Cana-de-Açúcar

O principal material utilizado neste trabalho é a fibra do bagaço de cana-de-açúcar. Este material foi coletado no dia 23 de julho de 2023 às 10:15, e foi doado por um vendedor de caldo de cana-de-açúcar em uma feira na região metropolitana de Belém-PA. A cana-de-açúcar utilizada neste trabalho é proveniente do município de Igarapé-Açu no estado do Pará.

A Figura 15 mostra o bagaço de cana-de-açúcar exposto para comercialização na feira onde é possível observar uma quantidade considerável de impurezas sobre o bagaço da cana-de-açúcar.

Figura 15 - Bagaço de cana-de-açúcar na feira local.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2023.

3.2 Métodos

3.2.1 Determinação dos Sólidos Solúveis Totais

Após a coleta do bagaço de cana-de-açúcar, iniciou-se a etapa experimental que consistiu na limpeza do material em uma torneira sob água corrente por um período de 5 minutos, visando remover o excesso de sacarose presente. Em seguida, o bagaço foi imerso em um recipiente com cerca de 20 litros de água destilada, onde permaneceu por um período de 3 dias. A cada intervalo de 24 horas, foi coletada uma amostra da água para análise, enquanto o restante foi devidamente descartado. A Figura 16 apresenta o bagaço de cana-de-açúcar imerso em meio a água destilada.

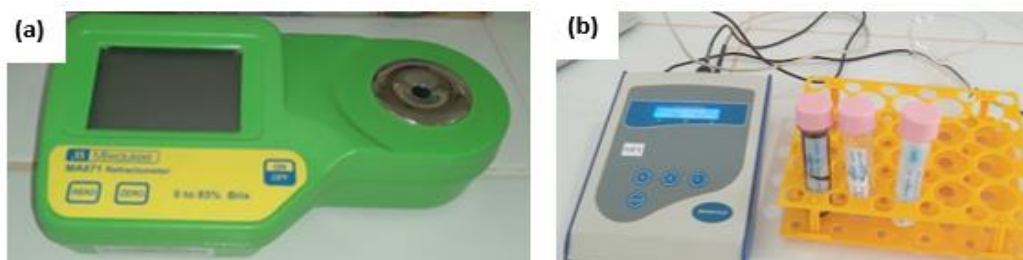
Figura 16 - Bagaço de cana-de-açúcar imerso em água destilada.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2023.

As amostras colhidas foram analisadas em um refratômetro digital da marca Milwaukee, modelo MA871, para calcular o teor de sacarose em graus Brix ($^{\circ}$ Brix), e um pHmetro para medir o valor de pH. Essas avaliações são de suma importância para determinar a quantidade de sólidos solúveis na água, representados pelo teor de $^{\circ}$ Brix, bem como para mensurar a acidez ou alcalinidade da solução, expressa pelo pH. A Figura 17 apresenta o refratômetro (a) e o pHmetro (b) utilizados.

Figura 17 - Refratômetro digital (a), pHmetro de bancada e amostras utilizadas (b).

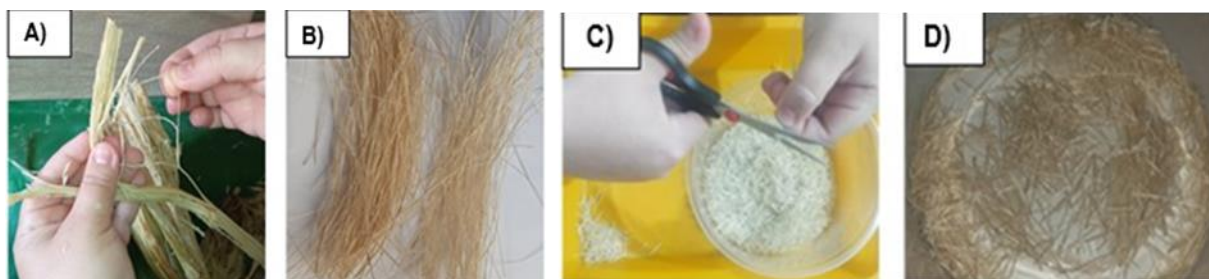


Fonte: Elaborado pela Autora, 2023.

3.2.2 Preparo do Bagaço da Cana-de-Açúcar

O processo de extração da fibra do bagaço de cana-de-açúcar foi realizado manualmente enquanto o material estava em estado úmido. As fibras extraídas foram posteriormente secas em temperatura ambiente e cortadas no tamanho de 15 mm. A Figura 18 mostra a, extração da fibra do bagaço da cana (a), a fibra extraída (b), a fibra sendo cortada (c) e a fibra já cortada (d).

Figura 18 - Extração da fibra do bagaço da cana (a), a fibra extraída (b), a fibra sendo cortada (c) e a fibra cortada (d).



Fonte: Elaborado pela Autora, 2023.

3.2.3 Tratamento Alcalino

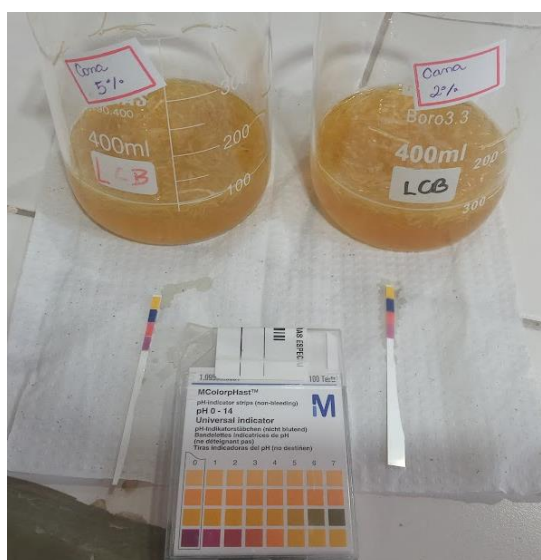
Parte das fibras, que foram cortadas em 15 mm, passaram por um tratamento químico alcalino, com soluções de hidróxido de sódio (NaOH) nas concentrações de 2% e 5% (m/v). A escolha das concentrações de NaOH baseou-se em estudos anteriores conduzidos por Oliveira (2018) e Souza (2021).

O tratamento foi conduzido com uma proporção de 200 ml de solução de NaOH para 1 g de fibras. As fibras foram imersas na solução por um período de 1 hora, sem agitação, mantendo-se a temperatura ambiente durante todo o processo.

Após o tratamento alcalino, as fibras foram submetidas a uma lavagem completa com água destilada até que seu pH fosse neutralizado. Posteriormente, para o processo de secagem, as fibras foram colocadas em uma estufa a uma temperatura de 100 °C por um período de 40 minutos.

A Figura 19 apresenta as fibras do bagaço da cana-de-açúcar durante o tratamento alcalino com NaOH nas porcentagens de 2% e 5%.

Figura 19 - Fibras durante o tratamento alcalino.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2023.

3.2.4 Determinação da Massa Específica

O procedimento para determinar a massa específica aparente das fibras foi conduzido pelo método do picnômetro. Primeiramente, foram registradas as massas do picnômetro vazio (m_1), do picnômetro contendo fibras (m_2), do picnômetro contendo fibras e água destilada (m_3) e contendo apenas água destilada (m_4). Com base nesses dados, o valor da massa específica aparente foi calculado de acordo com a Equação 1, em que ρ_{H_2O} denota o valor tabulado da densidade da água destilada

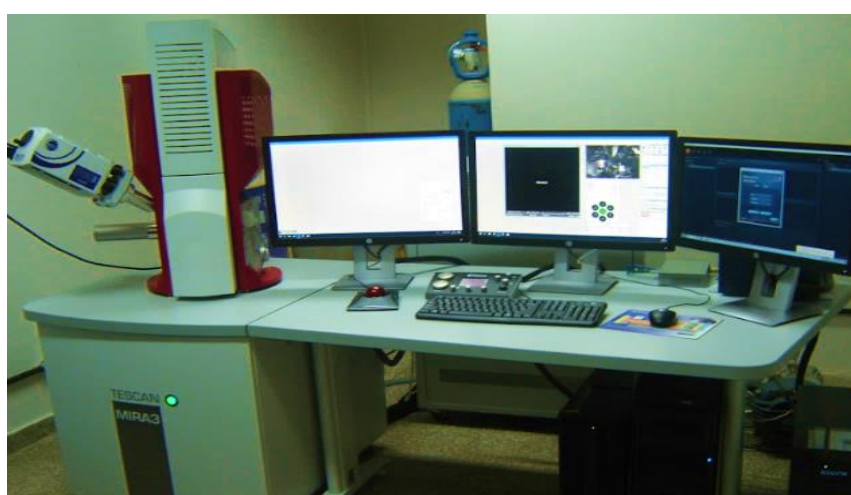
correspondente às temperaturas empregadas no momento do ensaio. Este ensaio foi realizado em triplicata para assegurar a precisão do resultado.

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

3.2.5 Morfologia das Fibras

A análise morfológica das fibras do bagaço de cana-de-açúcar tratadas e não tratadas, foi realizado utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV, da marca TESCAN, modelo Mira3, com canhão de elétrons tipo FEG (*field emission gun*). Equipado com sistema de microanálise por espectroscopia de Raios-X por dispersão de energia (EDS). Esta análise tem o objetivo de avaliar a influência da morfologia nas propriedades dos compósitos. o MEV das fibras foi realizado de forma simples, sem a necessidade de metalização da amostra. A análise foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LME) - parte do conjunto de Laboratórios Institucionais do Museu Paraense Emílio Goeldi, instalado no Campus de Pesquisa, no bloco de laboratórios anexo ao Departamento de Ciências da Terra e Ecologia (COCTE). A Figura 20 apresenta o microscópio eletrônico de varredura utilizado.

Figura 20 - Microscópio Eletrônico de Varredura.



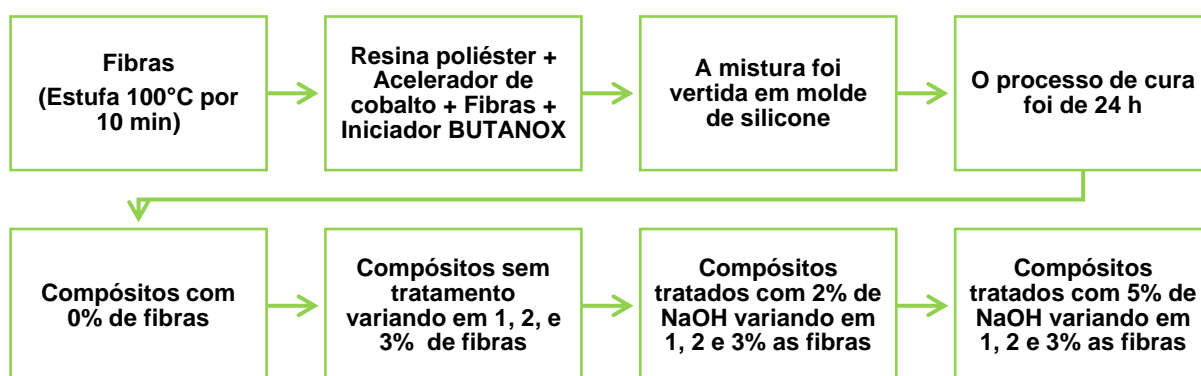
Fonte: Elaborado pela Autora, 2023.

3.3 Confeção dos Compósitos

A confecção dos compósitos foi realizada com os equipamentos disponíveis no Laboratório de Catálise - LABCAT e Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados – LAMPS, localizado no laboratório de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará – UFPA.

A Figura 21 apresenta um fluxograma que ilustra os passos empregados na fabricação dos compósitos.

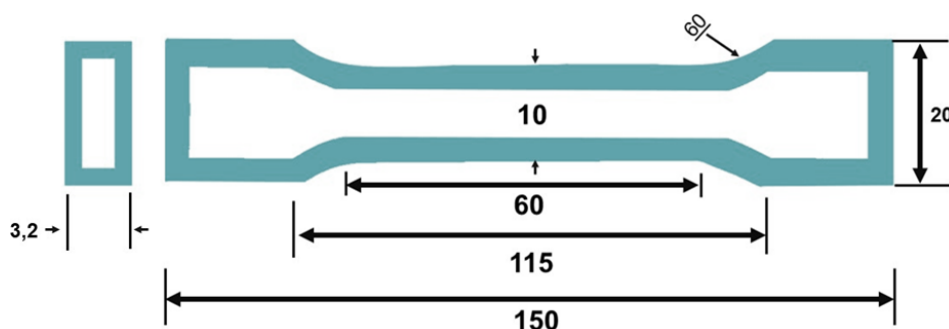
Figura 21 - Fluxograma da confecção dos compósitos.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2023.

Os corpos de prova fabricados seguiram as dimensões recomendadas pela norma ASTM D 638. A Figura 22 ilustra as dimensões dos corpos de prova fabricados.

Figura 22 - Dimensão do corpo de prova para o ensaio de tração.



Fonte: Adaptado de ASTM D 638, 2014.

Para retirar a umidade das fibras de bagaço de cana-de-açúcar utilizou-se a estufa com circulação de ar forçada da marca QUIMIS modelo Q314M, com temperatura de 100 °C pelo tempo de 10 min.

No experimento, foram produzidos corpos de prova do compósito de resina poliéster ortoftálica com as fibras provenientes do bagaço de cana de açúcar. Os corpos de prova foram divididos em quatro grupos, seguindo a seguinte ordem:

1. Corpos de prova sem tratamento químico variando a proporção das fibras em 1%, 2% e 3%.
2. Corpos de prova com tratamento alcalino de 2% (m/v) nas fibras variando a proporção das fibras em 1%, 2% e 3%.
3. Corpos de prova com tratamento alcalino de 5% (m/v) nas fibras variando a proporção das fibras em 1%, 2% e 3%.
4. Corpos de prova contendo apenas a matriz plena, sem adição de fibras (0%).

Essa estrutura experimental permiti a análise comparativa das propriedades dos compósitos em relação à incorporação de fibras e aos diferentes tratamentos alcalinos, fornecendo dados para avaliar o desempenho mecânico e outras características desses materiais.

O processo de fabricação foi executado por meio de moldagem manual utilizando moldes de silicone, sem a aplicação de agentes desmoldantes e sem emprego de compressão. A resina poliéster ortoftálica foi empregada como matriz, e foram determinados os volumes adequados do acelerador de cobalto (1,5% v/v) e do iniciador butanox (1% v/v) para cada porcentagem de interesse.

As fibras do bagaço de cana-de-açúcar foram levadas à estufa a 100°C por 10 minutos, a fim de retirar a umidade. Após a retirada do bagaço de cana da estufa, procedeu-se à preparação da mistura em um recipiente apropriado, seguindo a seguinte sequência: resina poliéster ortoftálica, acelerador de cobalto, fibra de bagaço de cana e iniciador butanox. Em seguida, o compósito foi vertido nos moldes de silicone. O processo de cura foi realizado durante um período de 24 horas, mantendo-se a temperatura ambiente. A Figura 23 apresenta os corpos de prova da matriz plena e do compósito sem tratamento alcalino respectivamente.

Figura 23 – Corpo de prova da matriz plena e do compósito sem tratamento alcalino.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2023.

Os compósitos fabricados com as fibras sem tratamento alcalino foram identificados como (CCAST), já os compósitos fabricados com tratamento alcalino com 2% de NaOH foram identificados como (CCAT2%) e os compósitos fabricados com tratamento alcalino com 5% de NaOH foram identificados como (CCAT5%) como é possível observar detalhadamente no Quadro 3.

Quadro 3 - Nomenclatura dos compósitos fabricados.

Nomenclatura	Descrição
MP	Matriz Plena
CCAST - 1%	Compósito de Cana-de-Açúcar Sem Tratamento Alcalino com 1% de Fibras
CCAST - 2%	Compósito de Cana-de-Açúcar Sem Tratamento Alcalino com 2% de Fibras
CCAST - 3%	Compósito de Cana-de-Açúcar Sem Tratamento Alcalino com 3% de Fibras
CCAT2% - 1%	Compósito de Cana-de-Açúcar Tratado com 2% de NaOH com 1% de Fibras
CCAT2% - 2%	Compósito de Cana-de-Açúcar Tratado com 2% de NaOH com 2% de Fibras
CCAT2% - 3%	Compósito de Cana-de-Açúcar Tratado com 2% de NaOH com 3% de Fibras
CCAT5% - 1%	Compósito de Cana-de-Açúcar Tratado com 5% de NaOH com 1% de Fibras
CCAT5% - 2%	Compósito de Cana-de-Açúcar Tratado com 5% de NaOH com 2% de Fibras
CCAT5% - 3%	Compósito de Cana-de-Açúcar Tratado com 5% de NaOH com 3% de Fibras

Fonte: Elaborado pela Autora, 2023.

3.4 Caracterização dos Compósitos

3.4.1 Ensaios Físicos

O método utilizado para a determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água nos compósitos de fibra de bagaço de cana-de-açúcar e matriz plena seguiu as normas ASTM D 570, (1998); ASTM D 2734 (2009); e ASTM D 792, (2008), respectivamente. Esses procedimentos foram conduzidos no Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados (LAMPS) da Universidade Federal do Pará.

Para a obtenção da massa seca, os corpos de prova foram colocados em uma estufa e mantidos a 105°C por um período de 24 h. Já para a determinação da massa úmida, os corpos de prova foram imersos em um recipiente com água e também mantidos por 24 h.

Os corpos de prova foram submetidos à pesagem utilizando uma balança analítica para a obtenção das massas secas (M_s) e úmidas (M_u). Além disso, a massa submersa (M_i) foi determinada colocando-se parcialmente o corpo de prova em água destilada para saturação. Para cada proporção dos compósitos, foram utilizados cinco corpos de prova para garantir a confiabilidade 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.

$$AA = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100 (\%) \quad (2)$$

$$PA = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \cdot 100 (\%) \quad (3)$$

$$MEA = \frac{M_s}{M_u - M_i} \cdot \rho_{H_2O} (g/cm^3) \quad (4)$$

E para obtenção da massa imersa (M_i) foi utilizado um aparato como mostra a Figura 24.

Figura 24 - Aparato utilizado para obter a massa imersa.



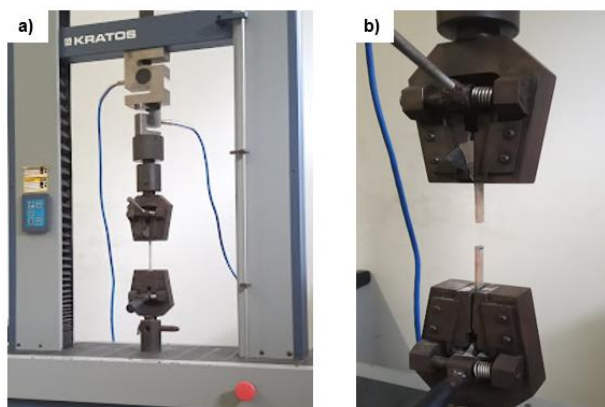
Fonte: Elaborado pela Autora, 2023.

3.4.2 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é um teste fundamental para caracterizar materiais, determinando suas propriedades mecânicas, especialmente resistência à tração e deformação antes da ruptura.

Para o ensaio de tração, foi seguida a norma ASTM D 638, (2014), utilizando um equipamento modelo KE 2000 MP da marca KRATOS, equipado com uma célula de carga de 5 kN. A velocidade de ensaio adotada foi de 5 mm/min. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará. Foram utilizados 8 corpos de prova para cada série fabricada para a realização deste ensaio. A Figura 25 a) mostra a máquina KRATOS preparada com o corpo de prova para o ensaio de tração e b) Corpo de prova rompido após ensaio.

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



Fonte: Elaborado pela Autora, 2023.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Determinação dos Sólidos Solúveis Totais

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise dos sólidos solúveis totais (°Brix) e do valor de pH durante o período de imersão do bagaço de cana-de-açúcar em água destilada. Os resultados indicam uma redução significativa no °Brix após 5 minutos de lavagem para remoção dos detritos. A partir de 48 horas de imersão, o valor do °Brix alcança 0, indicando a ausência de sólidos solúveis na solução. De acordo com os resultados encontrados na tabela, o processo de lavagem e imersão foi eficaz na eliminação dos sólidos solúveis, tais como a sacarose, presentes no bagaço de cana.

Tabela 2 - 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, 2023.

A análise dos dados da Tabela 2 apresenta uma redução gradativa do pH durante o período de imersão do bagaço de cana-de-açúcar em água destilada, atribuída à liberação de ácidos orgânicos solúveis na estrutura do bagaço. No entanto, após 72 horas, verificou-se um leve aumento no pH. Ronquim (2010), diz que esse aumento pode ser explicado pela reação dos ácidos orgânicos com os íons hidroxila presentes na água, formando sais e água de acordo com a teoria de Arrhenius. No caso do bagaço da cana-de-açúcar, os ácidos orgânicos presentes na solução podem reagir com os íons hidroxila da água, formando sais orgânicos e água. Essa reação pode diminuir a concentração de íons H⁺ na solução, aumentando o pH (FREITAS; BARBOSA; FORTE, 2016).

Durante o experimento, as impurezas liberadas pelo bagaço de cana ficaram retidas no recipiente de imersão.

4.2 Determinação da Massa Específica

Utilizando a Equação 1, procedeu-se ao cálculo da massa específica da fibra do bagaço de cana-de-açúcar, resultando em um valor de $0,658 \text{ g/cm}^3$. Este resultado demonstra uma proximidade significativa em relação ao dado encontrado na literatura consultada. De acordo com Shojaeiarani, Bajwa e Bajwa (2019), a massa específica do bagaço de cana-de-açúcar é de $0,635 \text{ g/cm}^3$. Essa concordância entre os valores atesta a precisão do método empregado para a determinação da massa específica da fibra do bagaço da cana-de-açúcar.

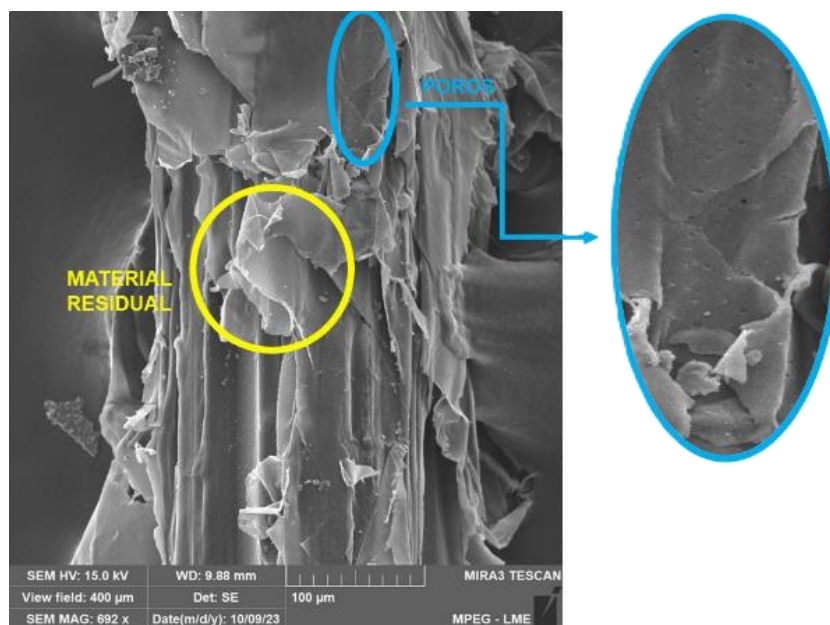
O resultado da massa específica da fibra tratada foi de $0,919 \text{ g/cm}^3$, valor que se aproxima ao encontrado por Dori (2022), em sua pesquisa, que registrou um valor de $0,839 \text{ g/cm}^3$.

O Hidróxido de Sódio é uma base forte que pode causar a remoção de impurezas, ceras e materiais não celulósicos das fibras isso pode contribuir para aumentar a densidade das fibras, tornando-as mais compactas e resistentes. No entanto, a densidade das fibras tratadas com NaOH pode variar dependendo da concentração da solução de NaOH e do tempo de tratamento (MOURA, 2022).

4.3 Morfologia das Fibras

A análise morfológica das fibras do bagaço de cana-de-açúcar, tanto *in natura* quanto submetidas a tratamento alcalino com NaOH a 2% e 5%, foi realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). O objetivo principal foi investigar os efeitos do tratamento químico nessas fibras. A micrografia da fibra *in natura* pode ser observada na Figura 26.

Figura 26 - Micrografia da fibra *in natura*.



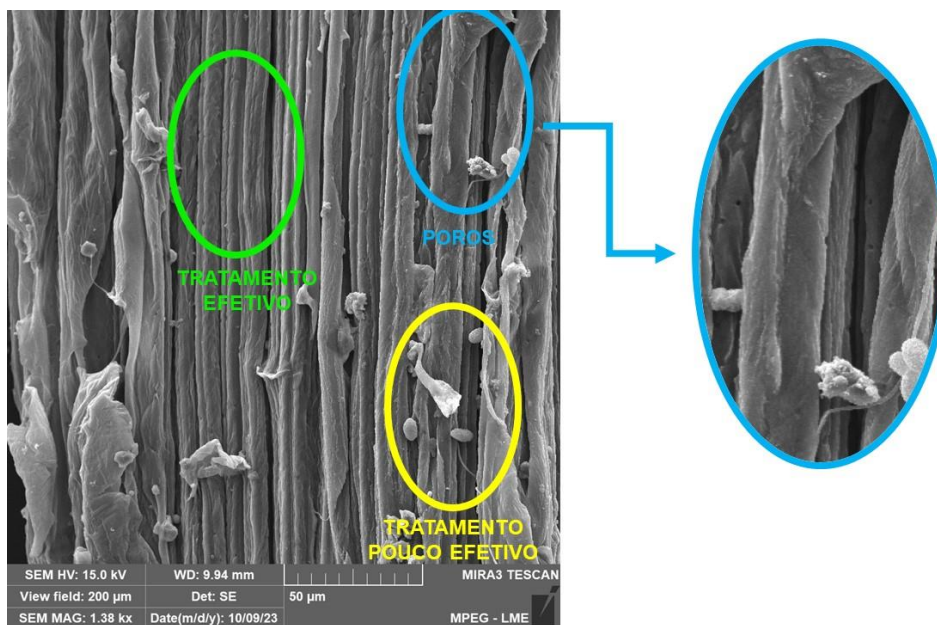
Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A micrografia apresenta fibras contínuas e alongadas e a presença de material residual como mostra o círculo amarelo. Segundo Lazarini (2020), esse material residual pode ser tanto espécies inorgânicas, como partículas minerais, quanto orgânicas, como cutículas (ceras foliares). Florindo (2017), acredita que esse material são ceras provenientes da lignina ou hemiceluloses presentes nas fibras naturais. Paiva (2018), comenta que as impurezas superficiais nas fibras vegetais podem prejudicar a interação com a matriz polimérica e reduzir a resistência mecânica dos compósitos.

No círculo azul é possível observar a presença de poros, esses orifícios são responsáveis por transportar água e nutrientes ao longo das fibras naturais. Eles ajudam na adesão entre a fibra e a matriz polimérica e estão presentes na maioria das fibras naturais, embora permaneçam cobertos pela camada superficial das fibras (FLORINDO, 2017).

A Figura 27 apresenta a micrografia da fibra do bagaço da cana-de-açúcar tratada quimicamente com 2% de NaOH.

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



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Na micrografia observa-se a presença de fibrilas alinhadas verticalmente, em destaque o círculo azul exhibe poros, o círculo verde sugere um tratamento efetivo devido a diminuição do material residual e rugosidade na superfície da fibra vegetal. O círculo amarelo sugere que o tratamento alcalino com 2% de NaOH foi parcialmente eficiente para remover o material residual, pois ainda há regiões da fibra com uma quantidade considerável desse material, o que pode comprometer a adesão com a matriz polimérica.

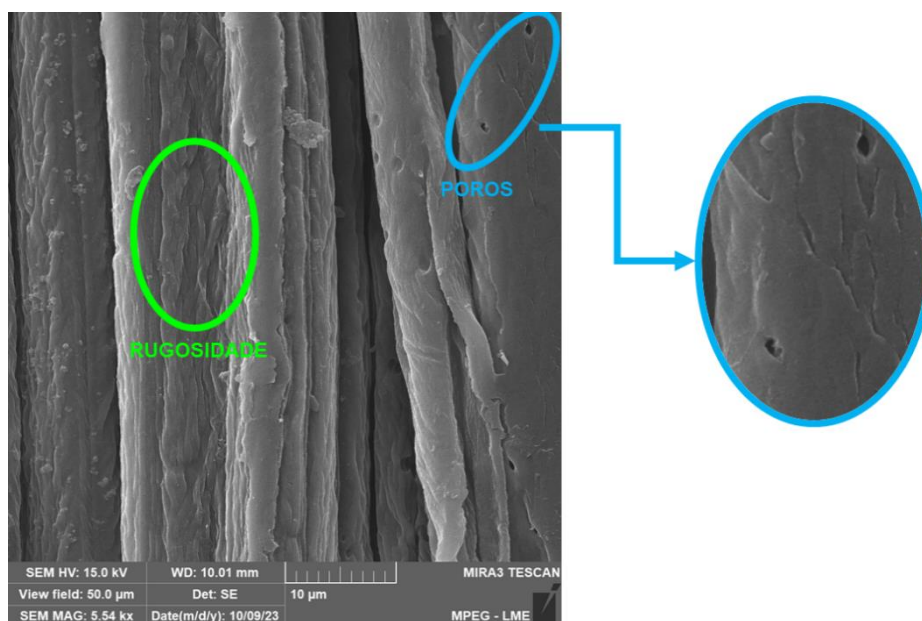
A presença de fibrilas alinhadas, conforme Oliveira (2018), ocorre porque as fibras naturais tendem a ser agrupadas, mas se desagregam após um processo químico. Este processo, conhecido como fibrilação, fragmenta o conjunto de fibras não processadas em partes menores, por meio da dissolução da hemicelulose. A fibrilação aumenta a área de superfície efetiva disponível, intensificando a interação com a matriz e resultando em uma melhoria na região de interface.

Segundo Lazarini (2020), o tratamento alcalino elimina uma grande quantidade de lignina das fibras, deixando as fibrilas e seus limites mais visíveis e, assim,

ampliando a área superficial da fibra. Esse processo provoca um aumento da rugosidade superficial e uma maior exposição dos grupos hidrofílicos da celulose.

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

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



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A micrografia apresenta fibrilas alinhadas mais limpas o círculo verde evidencia a maior rugosidade devido à remoção de material residual pelo tratamento alcalino, é possível notar no círculo azul a presença de poros. Também é possível observar que não houve degradação da fibra. Segundo Florindo (2017), o tratamento alcalino pode facilitar a adesão fibra-matriz polimérica ou causar alterações na morfologia da fibra.

Santos (2020) afirma que as fibras da cana-de-açúcar são hidrofílicas, característica que pode não favorecer a adesão da fibra com a matriz. No entanto, quando se realiza um pré-tratamento químico nas fibras, como o tratamento alcalino, elas apresentam uma melhor adesão à matriz devido à maior área superficial obtida. Esse aumento na área superficial pode estar vinculado ao aumento da rugosidade.

Os resultados obtidos pelo MEV indicam que o tratamento alcalino foi bem-sucedido. Já que as fibras *in natura* apresentaram grande quantidade de materiais residuais que são característicos das fibras que não sofreram nenhum tipo de tratamento químico. A micrografia das fibras tratadas com 2% de NaOH mostrou

limpeza em algumas partes das fibras. No entanto, em outras partes, ainda é possível observar a presença de material residual.

A micrografia das fibras tratadas com 5% de NaOH evidenciaram que essa porcentagem foi a que apresentou os melhores resultados, com uma estrutura mais limpa e rugosa, sem indícios de degradação indicando que essas fibras podem apresentar melhor ancoragem entre a fibra e a matriz.

4.4 Viabilidade de Confecção

A viabilidade de fabricação de um compósito empregando a fibra do bagaço da cana-de-açúcar foi investigada com base nas composições estabelecidas, que compreendiam fibras sem tratamento alcalino, fibras com tratamento alcalino de 2% e fibras com tratamento alcalino de 5%, em proporções variando entre 0%, 1%, 2% e 3%. O método de fabricação adotado consistiu na moldagem manual utilizando molde de silicone.

A Figura 29 ilustra os compósitos obtidos após o processo de cura, e é possível observar uma distribuição homogênea e um acabamento superficial satisfatório, resultando em compósitos com poucas imperfeições, como bolhas e vazios.

Figura 29 - Compósitos obtidos após o processo de cura.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

4.5 Ensaios Físicos

A Tabela 3 mostra os resultados dos ensaios de Massa Específica Aparente (MEA), Porosidade Aparente (PA) e Absorção de Água (AA) para a Matriz Plena (MP) e o compósito de fibra de cana-de-açúcar (CCA Foram fabricados compósitos sem tratamento alcalino, compósitos tratados com 2% de NaOH (CCAT2%) e compósitos tratados com 5% de NaOH (CCAT5%). Para cada tipo de compósito, foram consideradas diferentes proporções de fibras (1%, 2% e 3%).

Tabela 3 - Resultado dos ensaios físicos.

Fibra/ Proporção	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Porosidade Aparente (%)	Absorção de Água (%)
MP	1,199 ± 0,010	1,174 ± 0,637	0,984 ± 0,545
CCAST - 1%	1,181 ± 0,014	1,388 ± 0,541	1,175 ± 0,468
CCAST - 2%	1,155 ± 0,017	2,500 ± 0,800	2,145 ± 0,732
CCAST - 3%	1,154 ± 0,006	2,347 ± 0,398	2,025 ± 0,347
CCAT2% - 1%	1,659 ± 0,224	2,116 ± 1,659	1,670 ± 0,973
CCAT2% - 2%	1,448 ± 0,035	2,800 ± 1,478	1,837 ± 1,021
CCAT2% - 3%	1,464 ± 0,057	3,182 ± 1,838	2,102 ± 1,373
CCAT5% - 1%	1,435 ± 0,095	2,833 ± 1,292	2,079 ± 0,978
CCAT5% - 2%	1,453 ± 0,157	2,422 ± 1,783	1,667 ± 1,372
CCAT5% - 3%	1,450 ± 0,088	3,101 ± 0,629	2,139 ± 0,484

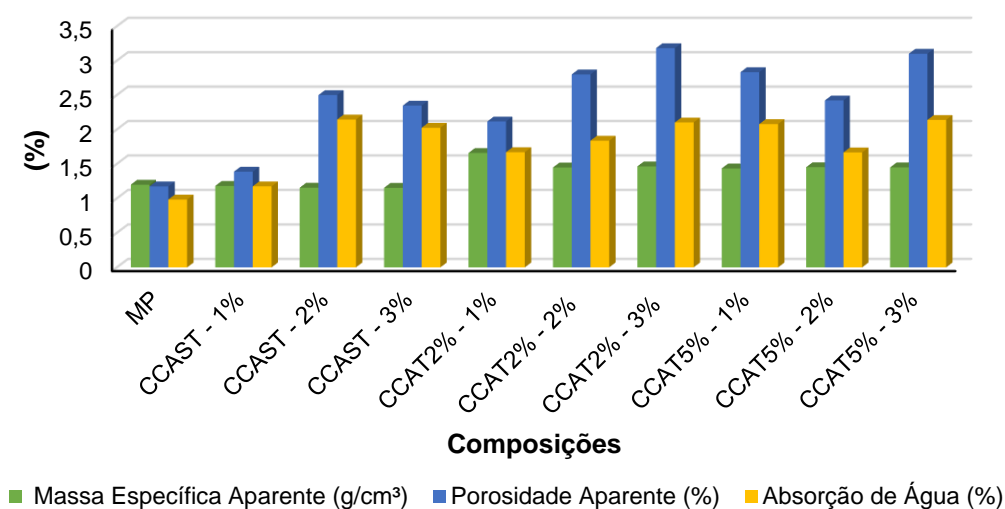
Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Com base nos resultados da Tabela 3, é possível observar que o compósito de fibras do bagaço de cana-de-açúcar sem tratamento, independentemente da proporção em fibras, apresenta massa específica aparente menor que a da matriz. Em contrapartida, o valor de porosidade aparente e absorção de água desses compósitos são maiores que os da matriz plena. Já as fibras com tratamento alcalino, independentemente da proporção de fibras utilizadas, apresentam valor de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água maior que o da matriz plena e dos compósitos sem tratamento.

Os resultados da massa específica nos compósitos sem tratamento podem ser explicados pelo fato de que a porosidade aparente revela uma estrutura porosa nas fibras de cana-de-açúcar. Isso resulta em espaços entre as células, tornando a massa específica menor que a resina poliéster ortoftálica, que é um material sólido (BRITO, 2018).

A Figura 30 apresenta um gráfico com os resultados da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água.

Figura 30 - Representação gráfica dos resultados dos ensaios físicos.

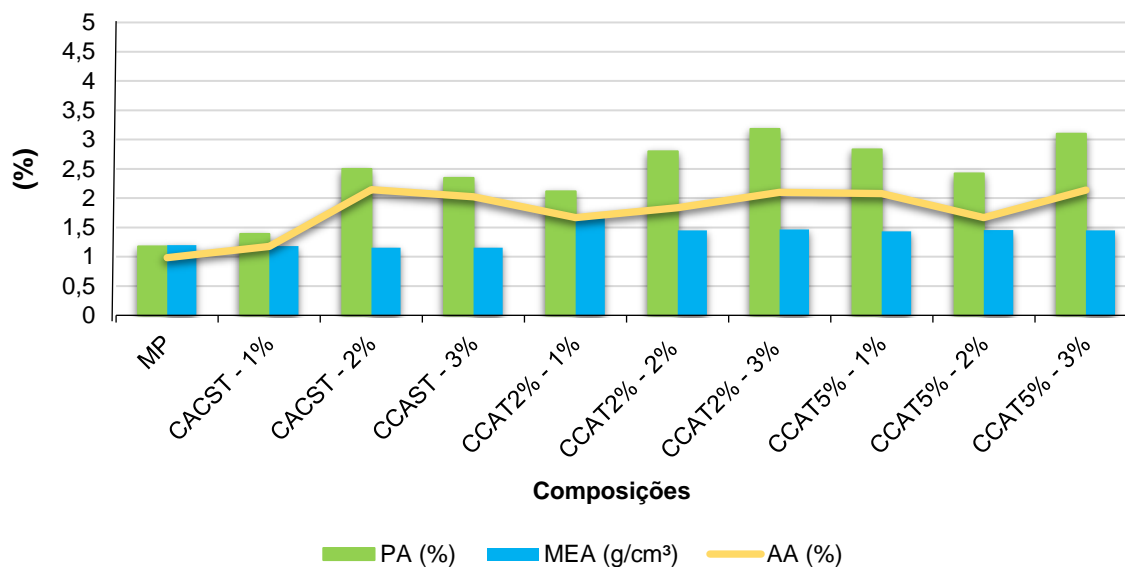


Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Em relação aos valores encontrados de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água nos compósitos de fibras tratadas, estes ocorreram porque, o processo de mercerização, que envolve a interação dos grupos alcalinos (NaOH) com os grupos hidroxila nas fases amorfas da fibra, resulta em uma fibra com superfície mais áspera e irregular. Isso ocorre devido à produção de moléculas de água que são removidas na lavagem subsequente e à reação dos grupos alcalinos restantes com a estrutura da fibra. Este processo leva a uma diminuição dos micros vazios e ao colapso das microfibrilas e do lúmen das fibras. Como resultado, a fibra tratada apresenta um aumento na massa específica aparente e na porosidade aparente, e uma diminuição na absorção de água (HAFIDZ; REHAN; MOKHTAR, 2021).

Portanto, os resultados das fibras tratadas estão em consonância com a regra da mistura, no qual cada fase que compõe o compósito tem um papel nas características efetivas do material (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2020).

A Figura 31 apresenta um gráfico que relaciona os resultados dos ensaios físicos.

Figura 31 - Gráfico relacionando os ensaios.

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Conforme a Figura 31, todos os compósitos exibiram maior porosidade aparente e absorção de água em comparação à matriz plena. No entanto, a massa específica aparente desses compósitos só ultrapassou matriz plena nos compósitos submetidos ao tratamento alcalino. As fibras sem tratamento alcalino apresentaram um valor de MEA inferior ao da MP.

4.6 Ensaio de Tração

Os dados obtidos pelo ensaio de tração foram organizados e estão apresentados na Tabela 4. Nesta tabela, é possível analisar os resultados referentes ao Limite de Resistência à Tração (LRT), alongamento e Módulo de Elasticidade (ME) dos compósitos produzidos com fibras de bagaço de cana-de-açúcar sem tratamento alcalino e com tratamento alcalino, variando as proporções das fibras em 0%, 1%, 2% e 3%.

Tabela 4 - Dados obtidos pelo ensaio mecânico de tração.

Fibra/ Proporção	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
MP	39,718 ± 3,430	6,322 ± 0,748	0,512 ± 0,080
CCAST - 1%	17,123 ± 2,482	3,243 ± 0,229	0,615 ± 0,208
CCAST - 2%	17,339 ± 1,365	2,448 ± 0,168	0,954 ± 0,203
CCAST - 3%	18,771 ± 2,647	2,987 ± 0,464	0,699 ± 0,236
CCAT2% - 1%	24,770 ± 0,912	4,348 ± 0,316	0,393 ± 0,055
CCAT2% - 2%	17,295 ± 1,907	5,073 ± 0,758	0,219 ± 0,036
CCAT2% - 3%	18,482 ± 1,042	6,128 ± 0,771	0,177 ± 0,028
CCAT5% - 1%	24,945 ± 3,269	4,550 ± 0,643	0,361 ± 0,069
CCAT5% - 2%	22,294 ± 3,180	4,098 ± 0,521	0,377 ± 0,057
CCAT5% - 3%	17,680 ± 1,376	3,423 ± 0,576	0,379 ± 0,093

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Conforme a Tabela 4 os resultados demonstraram que nenhum corpo de prova apresentou limite de resistência à tração (LRT) superior ao da Matriz Plena (MP). Os resultados para os corpos de prova da série com fibras sem tratamento se aproximaram dos valores encontrados nas literaturas pesquisadas como os trabalhos de Santos (2020), e Lopes *et al* (2019), que apresentam uma de média de 20 MPa. Já as fibras com tratamento alcalino com 2% de NaOH apresentaram valores de LRT próximos ao das fibras sem tratamento. As fibras com tratamento alcalino contendo 5% de NaOH, apresentaram os melhores valores de LRT e alongamento dentre todos os compósitos fabricados.

O valor encontrado para LRT das fibras sem tratamento alcalino segundo Santos (2020), pode estar relacionado a característica hidrofílica das fibras da cana-de-açúcar e esta característica pode não favorecer a adesão da fibra a uma matriz polimérica. O estudo realizado se assemelha ao de Lopes *et al*. (2019), que produziu compósitos de fibras de bambu e cana-de-açúcar usando uma matriz de poliéster tereftálico insaturado e pré-acelerado. O estudo comparou os resultados de tração mecânica e proporção mássica entre os dois tipos de compósitos. Os resultados obtidos para as fibras de cana-de-açúcar de 15 mm foram de 23,17 ± 1,58 MPa.

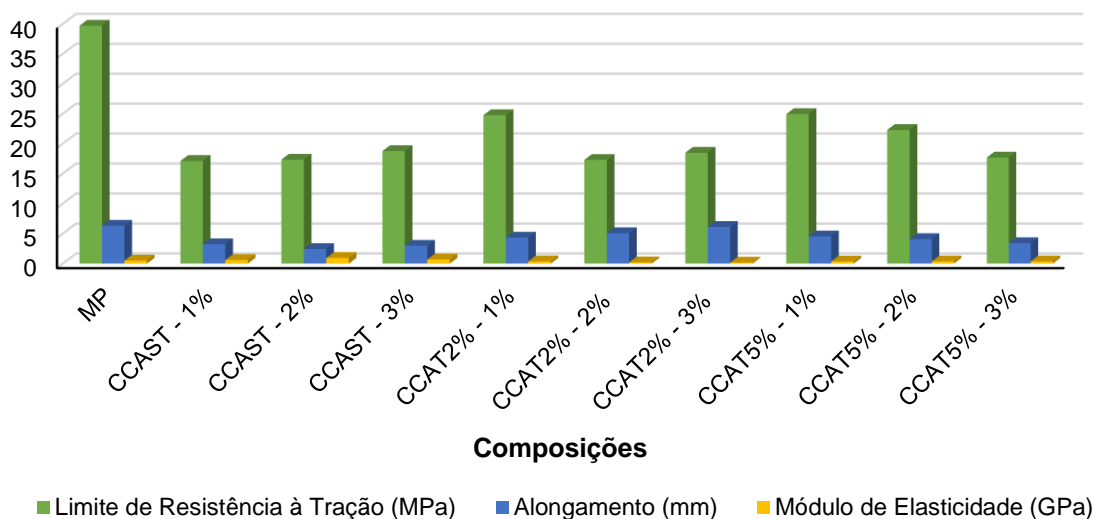
O aumento dos valores de LRT das fibras tratadas podem estar associados com o tratamento alcalino com NaOH realizado já que o tratamento pode modificar ou remover hemicelulose e lignina modificando a estrutura cristalina da celulose. Geralmente o NaOH age modificando a interação entre as fibras e a matriz, fazendo

com que as fibras são capazes de se ligar melhor ao compósito, reduzindo o caráter hidrofílico das fibras e melhorando a compatibilidade com a matriz (SOUZA, 2021).

O melhor resultado das fibras com 5% de NaOH está em consonância com o trabalho de BARTOS *et al.* (2020), que apresenta a influência da aplicação de pré-tratamento em diferentes concentrações em massa de polipropileno, com diferentes concentrações em volume de fibras de bagaço de cana tratadas e não tratadas. De acordo com os resultados obtidos, o tratamento com solução de NaOH com 5% em massa apresentou os melhores resultados. Além disso, a utilização de maiores teores de fibra e a aplicação de tratamento alcalino resultou em maior rigidez, além do aumento na resistência à tração do compósito com utilização de 25% em volume da fibra tratada (45,0 MPa) em relação ao compósito com o mesmo teor de fibra não-tratada (38,7 MPa).

A Figura 32 apresenta uma análise comparativa dos resultados encontrados para o ensaio mecânico de tração.

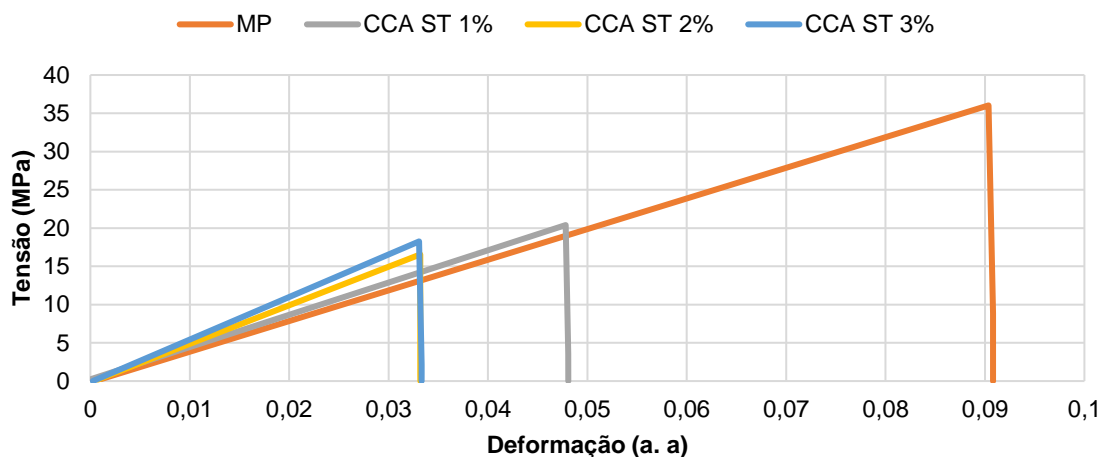
Figura 32 - Análise dos resultados mecânicos de tração.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A Figura 33 apresenta um gráfico comparando os resultados de tração com a deformação da matriz plena com as fibras do bagaço de cana-de-açúcar.

Figura 33 – Gráfico de Tensão X Deformação dos compósitos com fibras não tratadas.

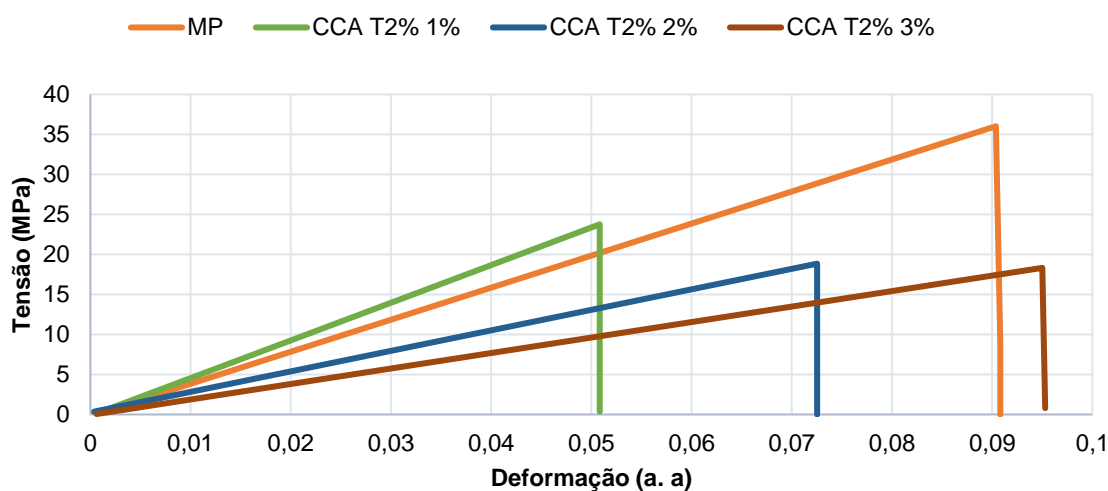


Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

É possível observar na Figura 33 que entre as séries não tratadas a que mais se aproximou da matriz plena foi a com 1% de fibras. Observa-se também que os compósitos com fibras do bagaço de cana-de-açúcar têm uma resistência à tração menor do que a matriz plena. A fibra de bagaço de cana-de-açúcar com proporção 1% tem um limite de resistência à tração de $17,123 \pm 2,482$ MPa e um alongamento de $3,243 \pm 0,229$ mm enquanto a matriz plena $39,718 \pm 3,430$ MPa e um alongamento de $6,322 \pm 0,748$ mm.

A Figura 34 apresenta um gráfico de tensão x deformação dos compósitos fabricados com tratamento alcalino com 2% de NaOH comparados com a matriz plena.

Figura 34 - Gráfico de Tensão X Deformação dos compósitos com fibras tratadas com 2% de NaOH.

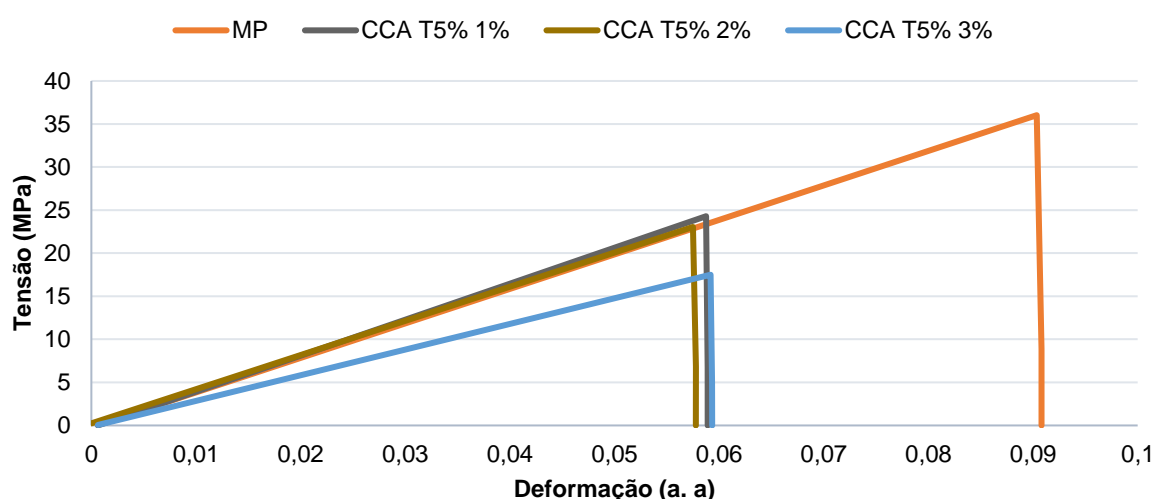


Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

De acordo com os dados fornecidos pelo gráfico da Figura 34 é possível observar que a tensão dos compósitos com fibras tratadas com 2% de NaOH não ultrapassaram a matriz plena, contudo o compósito contendo 3% de fibras apresentou maior deformação. O compósito contendo 1% de fibras apresentou a maior resistência à tração, com $24,770 \pm 0,912$ MPa. Esse fenômeno pode estar relacionado à saturação da matriz plena. Ou seja, ao aumentarmos a quantidade de fibras nos compósitos, pode-se estar saturando a matriz plena.

A Figura 35 apresenta o gráfico de Tensão X Deformação das fibras tratadas com 5% de NaOH comparadas com a matriz plena.

Figura 35 - Gráfico de Tensão X Deformação dos compósitos com fibras tratadas com 5% de NaOH.

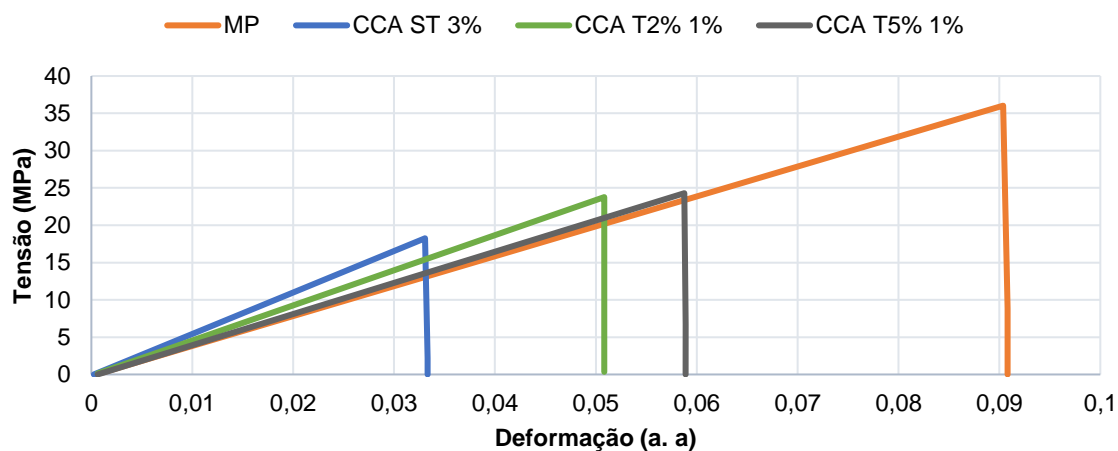


Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Diante dos dados fornecidos pelo gráfico da Figura 35 é possível observar que a tensão dos compósitos de fibras tratadas com 5% de NaOH não ultrapassaram a matriz plena, contudo o compósito contendo 1% de fibras apresentou maior valor de tensão e deformação em relação a todos os compósitos fabricados tanto não tratados quanto tratados com um valor de $24,945 \pm 3,269$ MPa.

A Figura 36 apresenta um gráfico de Tensão x Deformação comparando a matriz com os melhores resultados das fibras tratadas e não tratadas.

Figura 36 - Gráfico Tensão X Deformação entre os melhores compósitos e a matriz plena.



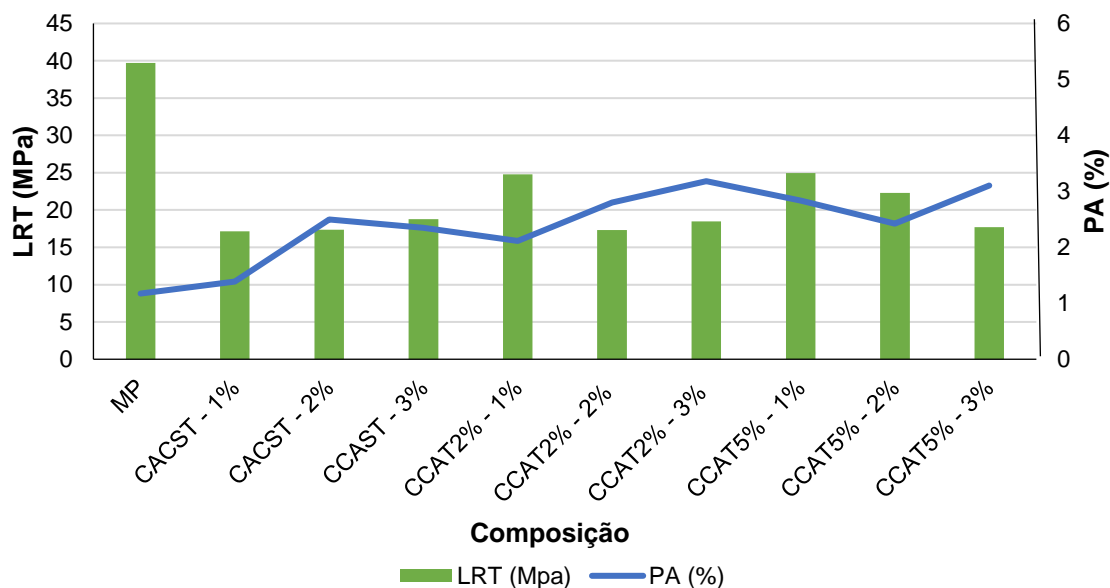
Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Os resultados obtidos estão em consonância com os resultados da microscopia da fibra. A baixa resistência à tração das fibras sem tratamento alcalino pode ser associada à presença de uma grande quantidade de material residual na fibra, o que resulta em uma baixa ancoragem entre a fibra e a matriz.

Por outro lado, as fibras tratadas com 5% de NaOH apresentaram valores de resistência à tração muito próximos aos dos compósitos tratados com 2% de NaOH. No entanto, os compósitos com 1% e 2% de fibras tiveram resultados ligeiramente superiores aos da mesma proporção tratados com 2% de NaOH. Já os compósitos com 3% de fibras tratados com 5% de NaOH apresentaram um valor inferior ao dos tratados com 2% de NaOH na mesma proporção. Ao confrontar este resultado com a análise microscópica, é possível inferir que o tratamento foi eficaz na limpeza das fibras. Isso resultou em fibras com maior rugosidade, proporcionando uma melhor ancoragem à resina.

A partir destes resultados nota-se que as fibras do bagaço de cana-de-açúcar não agiram como um reforço na matriz polimérica e sim como carga já que quando um material não contribui efetivamente para a melhoria das propriedades mecânicas (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2020).

A Figura 37 representa o gráfico que relaciona o limite de resistência à tração com a porosidade dos compósitos fabricados.

Figura 37 - Gráfico do Limite De Resistência a Tração X Porosidade Aparente.

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A partir da Figura 37, é possível observar como a resistência à tração do compósito muda com diferentes proporções de fibra e diferentes tratamentos. É notório que a resistência à tração tende a aumentar com o aumento da proporção de fibra para um determinado tratamento nas fibras sem tratamento. Já nas fibras tratadas observa-se que aumentar a proporção das fibras diminui-se o limite de resistência a tração. Além disso podemos observar que a absorção de água da maioria dos compósitos aumenta à medida que a proporção de fibras do compósito aumenta.

Esta redução no limite de resistência à tração, encontrada nos compósitos tratados, pode estar associada a vários fatores. Entre eles, podemos destacar que isso pode ocorrer quando o carregamento é ineficiente, levando as fibras a criar defeitos que fragilizam a matriz e reduzem a resistência mecânica do compósito (SOARES, 2017).

A Tabela 5 apresenta uma comparação dos melhores resultados encontrados no ensaio de tração para cada série dos compósitos fabricados, em relação à literatura e a materiais utilizados na indústria.

Tabela 5 - Comparativo dos resultados de tração obtidos com a literatura.

Materiais	Tensão de Resistência à Tração (MPa)	Fonte
CCAST	18,77	Este trabalho
CAST15 mm	23,17	(LOPES <i>et al</i> , 2019)
CCAT2%	24,77	Este trabalho
FCAT2%	32,00	(BARTOS, 2020)
CCAT5%	24,94	Este trabalho
FCAT5%	23,08	(SOUZA, 2021)
Policloreto de vinila (PVC)	10,00 a 25,00	(BRASKEN, 2023)
Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	24,00 a 31,00	(NITAPLAST, 2022)
Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)	6,00 a 12,00	(DREGER, 2017)
Madeira Duratex (MDF)	0,68 a 0,84	(BALLARIN, 2010)

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Por meio da Tabela 5, pode-se observar que em todas as series e composições utilizadas para fazer a comparação, os compósitos de fibras do bagaço de cana-de-açúcar apresentaram resultados de tensão de resistência à tração de acordo com a média obtida em outras literaturas.

5 CONCLUSÃO

5.1 Considerações finais

Os resultados da análise dos Sólidos Solúveis Totais (SST) indicaram que, após 48 horas de imersão do bagaço de cana-de-açúcar, o valor do °Brix alcança 0, sinalizando a inexistência de sólidos solúveis na solução. Além disso, o valor do pH também diminui durante esse período de 48 horas. Esses resultados sugerem que o processo de lavagem e imersão foi eficaz na remoção dos sólidos solúveis, como a sacarose, do bagaço de cana-de-açúcar.

O ensaio de massa específica realizado por picnometria mostra que a fibra de bagaço de cana-de-açúcar, quando não tratada, possui uma massa específica de 0,658 g/cm³. No entanto, as fibras que foram submetidas ao tratamento alcalino apresentaram uma massa específica de 0,919 g/cm³. Ambos os resultados estão em concordância com os dados encontrados na literatura, o que sugere que o ensaio foi realizado com eficiência.

Análise morfológica das fibras *in natura* do bagaço de cana-de-açúcar apresentaram uma estrutura fibrosa regular, com material residual e poros na superfície. Já a análise morfológica das fibras com tratamento alcalino indicam que o tratamento influenciou na morfologia das fibras do bagaço de cana-de-açúcar, removendo o material residual e aumentando a rugosidade superficial. A concentração de 5% de NaOH foi mais eficaz do que a de 2% de NaOH para o tratamento das fibras.

Diante destes resultados é possível dizer que os compósitos produzidos em moldes de silicone sem a necessidade de compressão demonstraram uma excelente uniformidade e um acabamento superficial de alta qualidade, com mínimas imperfeições, como bolhas e espaços vazios.

Os ensaios físicos mostraram que os compósitos sem tratamento alcalino apresentaram menor massa específica aparente, maior porosidade aparente e maior absorção de água do que a matriz plena. Isso pode estar associado às fibras não tratadas possuírem uma superfície irregular, suja e hidrofóbica, que dificulta a adesão com a matriz e cria espaços vazios na interface fibra-matriz. Os compósitos com tratamento alcalino apresentaram maior massa específica aparente, maior porosidade aparente e maior absorção de água do que a matriz plena e os compósitos sem tratamento, pois quando as fibras são tratadas com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), elas se tornam mais lisas, limpas e hidrofílicas, aumentando a área superficial

de contato e a interação com a matriz. Isso resulta em uma diminuição da porosidade e da absorção de água.

O ensaio de tração dos compósitos de fibras de bagaço de cana-de-açúcar, com e sem tratamento alcalino, mostrou que nenhum corpo de prova apresentou um Limite de Resistência à Tração (LRT) superior à Matriz Plena (MP). As fibras sem tratamento alcalino se aproximaram da média literária de 20 MPa, entre os compósitos as tratadas com 5% de NaOH demonstraram os melhores resultados de LRT e alongamento. Diante disto as fibras do bagaço de cana-de-açúcar agiram como carga nos compósitos, pois não contribuiu efetivamente para melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos de matriz polimérica. As cargas são usadas para modificar outras propriedades ou reduzir o custo do material, enquanto os reforços são usados para aumentar a resistência mecânica do compósito.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Investigar o efeito de diferentes tratamentos químicos nas fibras de bagaço de cana-de-açúcar, a fim de avaliar como esses tratamentos podem afetar as propriedades dos compósitos poliméricos.
- Avaliar outras propriedades dos compósitos, como a resistência à fadiga e à fratura, para determinar as aplicações mais adequadas para esses materiais.
- Analisar a viabilidade de utilizar outros tipos de fibras naturais como reforço em compósitos poliméricos, comparando suas propriedades com as fibras de bagaço de cana-de-açúcar.
- Explorar novas técnicas de processamento de compósitos poliméricos, como a moldagem por compressão a quente, para avaliar como essas técnicas podem afetar as propriedades dos materiais.
- Realizar tratamento alcalino combinado com tratamento ácido, comparar os resultados individualmente e analisar a composição química das fibras para compreender como os tratamentos impactam a estrutura molecular das fibras.

REFERÊNCIAS

ANGGONO, Juliana et al. **Structural Evaluation on Sugarcane Bagasse Treated Using Sodium and Calcium Hydroxide**. E3S Web Of Conferences, [S.L.], v. 130, p. 01018, 2019. EDP Sciences. Disponível em: <https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/56/e3sconf_ic-amme2018_01018.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2023.

ARAÚJO, Artemisa De Oliveira; MARTINS, Kássia Policarpo. **Obtenção de compósitos híbridos de fibras de vidro e fibras do bagaço de cana-de-açúcar com foco na aplicação em telhas poliméricas**. 2022. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade Evangélica de Goianésia, Goiás, 2022. Disponível em: <<http://repositorio.aee.edu.br/handle/aee/18842>>. Acesso em: 19 dez. 2023.

ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. **Ciência E Engenharia Dos Materiais**. 4. ed. Edição Norte Americana. Cengage Learning, 2019. 550 p. ISBN 978-8522128112.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004: **Resíduos Sólidos** – Classificação. Rio de Janeiro-RJ, 2004.

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.

BARBOSA, Marta Ribeiro; SOUZA, Lindomar Maria de; CAVALCANTI, Felipe Lira de Sá. **Uso do rejeito do caldo de cana como substrato na germinação de feijão: uma vivência de conscientização ambiental**. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, 7., 2022, Campina Grande. Anais. Campina Grande: Realize, 2022. p. 1-15. ISSN 2525-6696. Disponível em: <<https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/87829>>. Acesso em: 1 dez. 2023.

BARTOS, András. **Reinforcement of polypropylene with alkali-treated sugarcane bagasse fibers: mechanism and consequences**. Composites Science and Technology, [S.L.], v. 200, p. 108428, nov. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108428>>.

BRITO, Flavia Maria Silva. **Produção e avaliação da qualidade de painéis aglomerados constituídos por partículas de bagaço de cana-de-açúcar e bambu**.

2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-03052018-132019/pt-br.php>>. Acesso em 11 nov. 2023.

CALLISTER, W. D. JUNIOR. 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.

CAMPBELL, Flake. C. **Structural Composite Materials**. Editora ASM International. (2010). 630 p. Estados Unidos. ISBN: 978-1-61503-037-8.

CHBAGRO. **Plantas daninhas na cana-de-açúcar e indicação de manejo**. 2021. Disponível em: <<https://blog.chbagro.com.br/plantas-daninhas-na-cana-de-acucar-e-indicacao-de-manejo>>. Acesso em: 22 nov. 2023.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, DF, V. 11, N°. 1. abril 2023. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

CRUZ, Mateus Arlindo Da; CASANOVA, Rafaela Fontana; BOSCARDIN, Daiane; ZANCHET, Aline. **Análise da viabilidade do uso de resíduos de cana-de-açúcar para produção de aglomerantes sustentáveis**. *Materia* (Rio de Janeiro), v. 26, n. 4, p. e13113, 2021. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rmat/a/mQbQWKmK4GRMtdRz7JQ5zdb/?lang=pt>>. Acesso em: 11 dez. 2023.

DEEPAG. Devadiga; K. Subrahmanya Bhat; GT Mahesha. **Sugarcane bagasse fiber reinforced composites: Recent advances and applications**, (2020) *Cogent Engineering*, 7:1, DOI: 10.1080/23311916.2020.1823159. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1823159>>. Acesso em 17 dez. 2023.

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, 2022. Cap. 4. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/15941/TCC_Decio_Junior_Lovison_Dori.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 09 dez. 2023.

EL-BAKY, Marwa A. Abd; MEGAHED, Mona; EL-SAQQA, Hend H.; ALSHORBAGY, Amal E. **Mechanical Properties Evaluation of Sugarcane Bagasse-Glass/Polyester Composites**. *Journal Of Natural Fibers*, [S.L.], v. 18, n. 8, p. 1163-1180, 18 nov. 2019. Informa UK Limited. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1687069>>. Acesso em: 10 dez. 2023.

EMBRAPA. **Cana**. 2022. Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana>>. Acesso em: 09 nov. 2023.

EMBRAPA. **Outros produtos**. 2022. Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos->

producao/processamento-da-cana-de-acucar/outros-produtos>. Acesso em: 03 nov. 2023.

FIA. **Tecnologia verde**: o que é, tipos, vantagens e exemplos. 2021. Disponível em: <<https://fia.com.br/blog/tecnologia-verde/>>. Acesso em: 09 nov. 2023.

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>. Acesso em: 13 nov. 2023.

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

FREITAS, Edinilza Maria Anastácio; BARBOSA, Francisco Geraldo; FORTE, Cristiane Maria Sampaio. **Química Geral I**. 3. ed. Fortaleza: Uece, 2016. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/431843/2/Livro_Quimica%20Geral%20I.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2023.

GALLOS, Antoine; PAËS, Gabriel; ALLAIS, Florent; BEAUGRAND, Johnny. **Lignocellulosic Fibers: a critical review of the extrusion process for enhancement of the properties of natural fiber composites**. Rsc Advances, [S.L.], v. 7, n. 55, p. 34638-34654, 2017. Royal Society of Chemistry (RSC). Disponível em: <<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2017/RA/C7RA05240E/>>. Acesso em: 05 dez. 2023.

GOMES, Anne Velloso Sarmento; COSTA, Ney Róblis Versiani; MOHALLEM, Nelcy della Santina. **Os Tecidos e a Nanotecnologia**. Química Nova na Escola, [S.L.], v. 34, n. 4, p. 288-296, 2016. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc38_4/03-QS-43-15.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2023.

GOMES, Marinés Chiquinquirá Carvajal Bravo. **Caracterização de propriedades mecânicas de compósitos unidirecionais nanoestruturados**. 2019. 148 f. Dissertação (Doutorado) – Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos 2018. Disponível em: <<http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34R/3S77BRP>>. Acesso em: 09 nov. 2023.

GURGEL, A. do M., SOUTO, A. de S., GUEDES, C. A., GUEDES, G. H. F., PEREIRA, J. A. dos S., & BEZERRA, V. C. R. (2022). **Espelho sem reflexos: conflitos e vulnerabilidades socioambientais em uma região produtora de cana-de-açúcar**. Ciência & Saúde Coletiva, 27(3), 1049–1060. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/ssrZ6KVLskXMYzL54LvTVgn/?lang=pt#>. Acesso em: 24 dez. 2023.

HAFIDZ, Binti Mohd; REHAN, Bin Mohamed; MOKHTAR, Binti. **Effect of Alkaline Treatment on Water Absorption and Thickness Swelling of Natural Fibre Reinforced Unsaturated Polyester Composites**. *Materials Today: Proceedings*, v. 48, p.720–727, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321012918>>. Acesso em: 21 nov. 2023.

HAQ, Ikram Ul; QAISAR, Kinza; NAWAZ, Ali.; AKRAM, Fatima.; MUKHTAR, Hamid.; ZOHU, Xim.; XU, Young.; MUMTAZ, Muhammad Waseem; RASHID, Umer. **Advances in Valorization of Lignocellulosic Biomass towards Energy Generation**. *Catalysts*. (2021). Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/349639841_Advances_in_Valorization_of_Lignocellulosic_Biomass_towards_Energy_Generation#pf10>. Acesso em: 05 dez. 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal: Igarapé Açú** 2021. Rio de Janeiro. 2022. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/igarape-acu/pesquisa/14/10193?indicador=10250&tipo=grafico>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

KARIMAH, Azizatul; RIDHO, Muhammad Rasyidur; MUNAWAR, Sasa Sofyan; ADI, Danang Sudarwoko; ISMADI; DAMAYANTI, Ratih; SUBIYANTO, Bambang; FATRIASARI, Widya; FUDHOLI, Ahmad. **A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations**. *Journal Of Materials Research and Technology*, [S.L.], v. 13, p. 2442-2458, jul. 2021. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.014>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878542100569X>>. Acesso em: 09 dez. 2023.

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. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12656>>. Acesso em: 09 nov. 2023.

LEI Nº 12.305. “Institui a **Política Nacional de Resíduos Sólidos**”; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. 02 de agosto de 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 14 nov. 2023.

LEITE, Fernando Luís Pinheiro Pires. **Durabilidade de compósitos de matriz termoplástica - termoendurecível reforçada com fibras sintéticas e naturais**. 2017. 99 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia de Polímeros, Universidade do Minho, Braga, 2017. Cap. 2. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/1822/48258>>. Acesso em: 18 dez. 2023.

LOTFI, Amirhossein, LI. Huaizhong, DAO. Dzung Viet, PRUSTY. Gangadhara. **Natural fiber-reinforced composites: A review on material, manufacturing, and machinability**. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2021. 238-284.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0892705719844546>>. Acesso em: 17 dez. 2023.

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. Brazilian Journal of Development. Disponível em: <<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/1866/1844>>. Acesso em: 19 nov. 2023.

MAGAGULA, Sifiso; SEFADI, Jeremia Shale; MOCHANE, Mokgaotsa; MOKHOTHU, Thabang Hendrica; MOKHENA, Teboho. **The effect of alkaline treatment on natural fibers/biopolymer composites**. Surface Treatment Methods Of Natural Fibres And Their Effects On Biocomposites, [S.L.], p. 19-45, 2022. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128218631000028>>. Acesso em: 18 dez. 2023.

MARGEM, Jean Igor; MARGEM, Marina Rangel; MORAES, Ygor Macabu de; MARGEM, Frederico Muylaert; MONTEIRO, Sergio Neves. **Avaliação do comportamento das trações trativas em compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de sisal, bambu e malva**, p. 2987-2994. In: *72nd ABM Annual Congress*, São Paulo, 2017. ISSN: 2594-5327, DOI: 10.5151/1516-392X-30808. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/avaliacao-do-comportamento-das-tracoes-trativas-em-compositos-de-matriz-poliester-reforcados-com-fibras-de-sisal-bambu-e-malva>>. Acesso em: 09 nov. 2023.

MIRANDA, Nahieh Toscano; MOTTA, Ingrid Lopes; MACIEL FILHO, Rubens; MACIEL, Maria Regina Lobo. **Sugarcane bagasse pyrolysis: A review of operating conditions and products properties**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 149, p. 111394, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111394>. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032121006791>>. Acesso em: 15 dez. 2023.

MOURA, Cassiano Rodrigues. **Avaliação da resistência mecânica da fibra de bambu tratada com hidróxido de sódio**. Revista Principia, Joao Pessoa, v. 56, p. 107-115, 2021. Disponível em: <<https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/viewFile/3355/1780>>. Acesso em: 18 dez. 2023.

MURRAY, Robynne E. BEACH, Ryan. BARNES, David. SNOWBERG, David. BERRY, Derek. ROONEY, Samantha. JENKS, Mike. GAGE, Bill. BORO, Troy. WALLEN, Sara. HUGHES, Scott. **Structural validation of a thermoplastic composite wind turbine blade with comparison to a thermoset composite blade**. Renewable Energy, v. 164, 2021. p. 1100-1107. ISSN: 0960-1481. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.040>>. Acesso em: 09 nov 2023.

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

OLIVEIRA, Janaina da Costa Pereira Torres de. MACHADO, Maria Clara de Oliveira. **"Estudo das propriedades mecânicas da resina poliéster cristal."** *Congresso Brasileiro de Ciências e Saberes Multidisciplinares.* 2022. Disponível em: <<https://conferenciasunifoa.emnuvens.com.br/tc/article/view/4/2>>. Acesso em: 25 dez. 2023.

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, 2018. 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>. Acesso em: 11 nov. 2023.

PAIVA, Fábio Friol Guedes de. **Compósito De Borracha Natural Com Incorporação De Bagaço Da Cana-de-açúcar.** 2018. Dissertação (Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais – FCT) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Universidade Estadual Paulista (Unesp). 2018. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/154986>>. Acesso em 20 nov. 2023.

PEREIRA, Larissa de Fátima Chaves. **Simulação por elementos finitos do comportamento mecânico de materiais compósitos reforçados com fibras naturais.** 2018. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/46811?mode=full>>. Acesso em: 28 nov. 2023.

PEREIRA, Tamires Galvão Tavares. **Compósitos produzidos com resina poliéster e fibras de eucalipto tratadas termicamente.** 2016. 104 f. Dissertação (mestrado) – no curso de Engenharia de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras, 2016. Disponível em: <<http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/11826>>. Acesso em: 10 dez. 2023.

PRADO, Karen S.; JACINTO, Asaph A.; SPINACÉ, Márcia A. S. **Cellulose Nanostructures Extracted from Pineapple Fibres.** *Pineapple Leaf Fibers*, [S.L.], p. 185-234, 2020. Springer Singapore. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-1416-6_10#citeas>. Acesso em: 05 nov. 2023.

REDELEASE. **Resina Ortoftalica / Laminação com Catalisador (530 g).** 2023. Disponível em: <<https://www.redelease.com.br/resina-ortoftalica-laminac-o-com-catalisador-530-g.html>>. Acesso em: 21 dez. 2023.

RYE, Connie. WISE, Robert. JURUKOVSKI, Vladimir. DESAIX, Jean. CHOI, Jung. AVISSAR, Yael. **Biology: Potential, Kinetic, Free, and Activation Energy.** OpenStax.

(2016). Houston, Texas. Disponível em: <<https://openstax.org/books/biology/pages/1-introduction>>. Acesso em: 10 dez. 2023.

ROCHA, Denis Rodrigues da. **Estruturas De Aeronaves: análise do aumento da utilização de materiais compósitos**. 2020. 49 f. Monografia (Especialização) - Curso de Ciências Aeronáuticas, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2020. Cap. 1. Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/items/a6243735-61f1-4744-b2a1-29d786e34e95>>. Acesso em: 16 nov. 2023.

RONQUIM, Carlos Cesar. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa, 2010. 26 p. ISSN 1806-3322. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/31004/1/BPD-8.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2023.

SAKAMOTO, Clóvis. **Resina Poliéster Insaturado: resinas ortoftálicas**. Resinas Ortoftálicas. 2018. SILAEX QUIMICA. Disponível em: <<https://silaex.ind.br/resina-poliester>>. Acesso em: 27 nov. 2023.

SANTOS, B. Henrique. **Caracterização de compósitos de amido termoplástico com fibras de bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado) no curso de Nanociência e Materiais Avançados da Universidade Federal do ABC. São Paulo, p. 116. 2020.

SEO, Emilia S.M.; BARBOSA, Isabella T.F.; ATHIE, Alessandro A.R.; LUCA, Adriano C. de. **Obtaining and characterization of polymeric composites reinforced with natural fibers**. International Journal of Development Research, v. 11, n. 10, p. 50900-50903, 2021. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/32639>>. Acesso em: 23 nov. 2023.

SILVA, Aretusa Campelo da. **Caracterização e análise da viabilidade da produção de compósitos à base de resina poliéster e diferentes particulados**. 2022. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/50581>>. Acesso em: 27 nov. 2023.

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. 2023.

SOARES, Márcio R. F. **Materiais Compósitos Aspectos Gerais e Aplicações**. 2017. UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL. Disponível em: <<https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/05-12-17-materiais-compositos-e-aplicacoes1.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2023.

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>. Acesso em: 11 dez. 2023.

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/bitstream/11422/16174/1/YGSouza.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2023.

TITA, Sandra. Patricia. da. Silva; MEDEIROS, Ricardo de; TARPANI, José. R.; FROLLINI, Elisabete; TITA, Volnei. **Chemical modification of sugarcane bagasse and sisal fibers using hydroxymethylated lignin: Influence on impact strength and water absorption of phenolic composites**. Journal of Composite Materials, London, V. 52, Ed. 20, p. 2743 – 2753, 2018. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0021998317753886>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

XU, Qing; JI, Tao; GAO, San-Ji; YANG, Zhengxian; WU, Nengsen. **Characteristics and Applications of Sugar Cane Bagasse Ash Waste in Cementitious Materials**. Materials, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 39, 22 dez. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma12010039>. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/12/1/39>>. Acesso em: 14 nov. 2023.