

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

FRANCISLAINE CRISTINA DOS SANTOS  
ROBERTA PESTANA DA SILVA

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO DE PEBD COM  
FIBRA DE CANA-DE-AÇÚCAR *IN NATURA* E MODIFICADA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA  
2021

FRANCISLAINE CRISTINA DOS SANTOS  
ROBERTA PESTANA DA SILVA

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO DE PEBD COM  
FIBRA DE CANA-DE-AÇÚCAR *IN NATURA* E MODIFICADA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Fábio Cezar Ferreira

LONDRINA  
2021

## TERMO DE APROVAÇÃO

**FRANCISLAINE CRISTINA DOS SANTOS  
ROBERTA PESTANA DA SILVA**

### **OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO DE PEBD COM FIBRA DE CANA-DE-AÇÚCAR *IN NATURA* E MODIFICADA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 18 de agosto de 2021 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. As candidatas foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

---

Profª. Drª. Joice Erica Matezuki  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

---

Prof. Dr. Fábio Cezar Ferreira  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Química)

---

Profª. Drª. Silvia Midori Higa  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)  
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos acima de tudo à Deus, por ter nos dado força e nos sustentado em todo o tempo e nos ajudado a superar as dificuldades. A ele toda honra e glória.

Ao nosso professor orientador Dr. Fábio Cezar Ferreira, por todo apoio na realização desse trabalho, incentivo e valiosos ensinamentos passados durante o curso.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Londrina, pelas oportunidades de aprendizado, apoio através da estrutura e recursos disponíveis.

Aos meus pais, Aparecido e Madalena, pelo amor, carinho, educação e por sempre me apoiarem nas minhas escolhas.

À minha irmã Patrícia por todo o incentivo e apoio incondicional para minha formação.

Ao meu namorado Rogelio por todo amor, apoio e companheirismo nessa reta final do curso.

As minhas amigas, Kaira, Natália, Estela, Pamela e Vanessa por terem estado comigo dando apoio e se fazerem presente nessa importante jornada. Sou muito grata por ter cada uma em minha vida.

A todos, que mesmo indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Inês e Roberto, que estiveram comigo em todos os momentos, por todo o apoio, carinho, sabedoria, motivação, conselhos e ensinamentos.

Aos meus irmãos, Natasha e Iago, que tornaram essa caminhada alegre através de todo o companheirismo e incentivo que me deram.

A minha tia Márcia, que realizou um trabalho de desenvolvimento comigo. A todos os meus familiares que sempre estiveram ao meu lado.

Ao meu namorado Eduardo, por trazer leveza, por toda parceria, cuidado e carinho.

A minha amiga Ana, que está comigo desde quando ingressei na faculdade, sendo o meu apoio e incentivo diário nessa jornada.

A minha eterna gratidão a cada um que fez e faz parte da minha história.

## RESUMO

SANTOS, Francislaine C.; SILVA, Roberta P. **Obtenção e caracterização de compósito de PEBD com fibra de cana-de-açúcar *in natura* e modificada.** 2021. 51 f. Exame de qualificação de conclusão de curso – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2021.

O aumento no estudo e desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica com fibras vegetais se dá pela busca em reduzir o consumo energético e os impactos ao meio ambiente. Dentre as fibras vegetais, a mais comercializada e com ampla atividade agrícola no Brasil são as fibras de bagaço de cana-de-açúcar, devido a sua safra elevada durante praticamente todo o decorrer do ano, que facilita sua obtenção. A sua utilização como reforço em compósitos termoplásticos de grande interesse econômico e ambiental. Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho foi produzir corpos de prova de compósitos com matriz de polietileno de baixa densidade reforçados com diferentes teores de fibras de cana-de-açúcar *in natura* e modificada, a fim de avaliar suas propriedades mecânicas através do ensaio de tração. Apesar dos corpos de prova serem feitos por moldagem por compressão, através da prensagem em placas metálicas, os resultados obtidos foram satisfatórios, conseguindo produzir corpos de prova regulares e com uma boa dispersão das fibras na matriz polimérica, isso devido a um processo de prensagem eficiente. Contudo, a caracterização mecânica do PEBD puro e dos compósitos, revelam que com o aumento do teor de fibras nos compósitos as propriedades mecânicas de resistência a tração e deformação elástica diminuíram, ocorrendo uma diminuição também na deformação plástica. Com exceção do compósito contendo 20% (m/m) de fibra de cana-de-açúcar modificada, que apresentou uma rigidez e resistência maior que o compósito com 15% (m/m) de fibra modificada. Assim, com o aumento do teor de fibra o desempenho mecânico do compósito foi prejudicado, devido ao aumento na quantidade de concentradores de tensão no sistema, que acabaram reduzindo a resistência e deformação do material.

**Palavras-chave:** Polietileno de baixa densidade; Bagaço de cana-de-açúcar; Fibras vegetais; Compósitos; Propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

SANTOS, Francislaine C.; SILVA, Roberta P. **Production and characterization of LDPE composite with *in natura* and modified sugarcane fiber.** 2021. 51 f. Qualification examination of course completion - Department of Materials Engineering, Federal Technological University of Paraná. Londrina, 2021.

The increase in the study and development of polymeric matrix composites with vegetable fibers is due to the search to reduce energy consumption and the impacts on the environment. Among the vegetable fibers, the most commercialized and with extensive agricultural activity in Brazil are sugarcane bagasse fibers, due to its high harvest during practically the entire year, which facilitates its obtainment. Its use as reinforcement in thermoplastic composites of great economic and environmental interest. Thus, the main objective of this work was to produce composite specimens with a low density polyethylene matrix reinforced with different contents of *in natura* and modified sugarcane fibers, in order to evaluate their mechanical properties through the test of traction. Although the specimens are made by compression molding, through pressing on metal plates, the results obtained were satisfactory, managing to produce regular specimens and with a good dispersion of fibers in the polymer matrix, due to an efficient pressing process. However, the mechanical characterization of pure LDPE and composites reveals that with the increase of fiber content in the composites, the mechanical properties of tensile strength and elastic deformation decreased, with a decrease also in plastic deformation. With the exception of the composite containing 20% (m/m) of modified sugarcane fiber, which presented greater stiffness and strength than the composite with 15% (m/m) of modified fiber. Thus, with the increase in fiber content, the mechanical performance of the composite was impaired, due to the increase in the amount of stress concentrators in the system, which ended up reducing the material's strength and deformation.

**Keywords:** Low density polyethylene; Sugarcane bagasse; Vegetable fibers; Composites; Mechanical properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da estrutura molecular do PEBD .....	17
Figura 2 - Polímero polietileno.....	18
Figura 3 - Estrutura molecular da celulose .....	19
Figura 4 - Alguns componentes presentes na hemicelulose .....	19
Figura 5 - Principais unidades aromáticas presente na estrutura da lignina .....	20
Figura 6 - Desenho esquemático da estrutura de uma fibra vegetal .....	20
Figura 7 - Morfologia da planta cana-de-açúcar: (a) Raízes, colmo, folha e inflorescência; (b) Colmo, constituído por nó, gema, casca e parênquima .....	22
Figura 8 - Classificação dos materiais compósitos.....	23
Figura 9 - Corpo de prova no formato gravata para o ensaio de tração .....	26
Figura 10 - Curva esquemática tensão-deformação do comportamento mecânico de um material polimérico .....	26
Figura 11 - Fluxograma do procedimento experimental utilizado neste trabalho .....	28
Figura 12 - Fibras do bagaço de cana-de-açúcar cortadas em aproximadamente 5 cm .....	29
Figura 13 - Moinho de facas tipo Willye Star FT 50.....	30
Figura 14 - Processo de extração do açúcar da fibra e outros resíduos .....	31
Figura 15 - Fibras filtradas na peneira de 420 mm/ $\mu$ m.....	31
Figura 16 - Estufa à vácuo SL 104/30 .....	32
Figura 17 - Estufa microprocessada.....	32
Figura 18 - Pellets de PEBD.....	33
Figura 19 - Prensa hidráulica utilizada no processo de prensagem .....	35
Figura 20 - Parâmetros utilizados no processo de prensagem .....	35
Figura 21 - Produção dos corpos de prova. (A) Placa de compósito PEBD reforçado com fibras de cana-de-açúcar; (B) Placa com cunha para retirar o corpo de prova; (C) Retirando corpo de prova com a cunha na prensa; (D) Corpos de prova .....	36
Figura 22 - Ensaio de tração. (A) Corpo de prova fixado no equipamento, antes do ensaio; (B) Corpo de prova após ensaio .....	37
Figura 23 - Processo de moagem da fibra de cana-de-açúcar.....	38
Figura 24 - Fibras modificadas após a primeira secagem .....	40
Figura 25 - Placa de aço com mistura de PEBD/fibra de cana-de-açúcar.....	40



Figura 26 - Compósito de PEBD com 20% de fibra de cana-de-açúcar in natura.....	41
Figura 27 - Corpos de prova com fibras de cana de açúcar: (A) in natura; (B) modificada.....	42
Figura 28 - Curva tensão x deformação do compósito PEBD puro e o compósito com 5/10/15 e 20% (m/m) de fibra de cana-de-açúcar in natura .....	43
Figura 29 - Curva tensão x deformação do compósito PEBD puro e o compósito com 5/10/15 e 20% (m/m) de fibra de cana-de-açúcar modificada .....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características e propriedades da fibra de bagaço de cana-de-açúcar ...	22
Tabela 2 - Classificação dos ensaios dos materiais .....	25
Tabela 3 - Descrição das formulações utilizadas na produção dos compósitos.....	34

## LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CP	Corpo de prova
CPN	Compósito reforçados com fibras de cana-de-açúcar <i>in natura</i>
CPM	Compósito reforçados com fibras de cana-de-açúcar modificada
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i> – Calorimetria Exploratória Diferencial
FC	Fibra de cana-de-açúcar
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
TGA	<i>Thermogravimetric Analysis</i> - Termogravimetria ou Análise Termogravimétrica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2 OBJETIVO</b> .....	15
2.1 Objetivo geral .....	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
<b>3 JUSTIFICATIVA</b> .....	16
<b>4 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	17
4.1 Polietileno de baixa densidade (PEBD).....	17
4.2 Fibras naturais.....	18
4.2.1 Fibras de cana-de-açúcar .....	21
4.3 Compósitos .....	23
4.3.1 Compósitos reforçados com fibras naturais .....	24
4.3.2 Matrizes termoplásticas .....	24
4.4 Técnica de caracterização .....	24
4.4.1 Ensaio de Tração.....	24
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	28
5.1 Obtenção e preparação das fibras .....	29
5.1.1 Moagem das fibras .....	29
5.1.2 Tratamento das fibras.....	30
5.1.3 Secagem das fibras.....	31
5.2 Obtenção do polietileno de baixa densidade.....	33
5.2.1 Moagem do polietileno de baixa densidade .....	33
5.3 Preparação dos compósitos .....	34
5.4 Prensagem .....	34
5.5 Caracterização Mecânica .....	36
5.5.1 Ensaio de Tração .....	36
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	38
6.1 Preparação das fibras e do polímero.....	38
6.2 Tratamento das fibras .....	39
6.3 Prensagem compósito PEBD com fibra de cana-de-açúcar .....	40
6.4 Propriedades mecânicas.....	42
<b>7 CONCLUSÃO</b> .....	46

<b>8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade em adquirir materiais com propriedades superiores aos materiais convencionais, fez com que surgissem os chamados materiais compósitos, uma combinação de dois ou mais constituintes diferentes, formado por uma matriz e um reforço. No material compósito as propriedades mecânicas são influenciadas pelo grau de adesão entre a matriz e as fibras (GOMES, 2015).

O grande desenvolvimento industrial e a produção elevada de diversos produtos acarretou em um aumento na quantidade de gases poluentes no meio ambiente, assim como os materiais não recicláveis, prejudicando a natureza e os animais. Com isso, tem aumentado o estudo e o desenvolvimento de materiais que sejam menos nocivos ao meio ambiente, conseqüentemente o estudo de compósitos de matriz polimérica com fibras vegetais, pois estes reduzem o consumo energético e diminuem os impactos ao meio ambiente. Isso devido a algumas características das fibras vegetais, como: baixo custo, biodegradabilidade, baixa toxicidade, boas propriedades mecânicas e baixa densidade (OLIVEIRA, 2018).

As fibras vegetais apresentam diversas vantagens justamente por conta de sua origem e das propriedades que podem ser obtidas, no entanto as suas propriedades podem variar devido às condições climáticas, a idade e plantio da planta, assim como o local em que as fibras são retiradas da planta (PAULA, 2011; SCHMIDT, 2016).

No Brasil, existem diversas usinas de cana-de-açúcar que produzem o etanol e extraem o açúcar, se tratando assim de uma matéria prima de fonte renovável, que permite a realização de estudos para o reaproveitamento do bagaço da cana-de-açúcar.

Existem vários processos pelos quais os materiais compósitos podem ser obtidos, dentre estes tem a moldagem por compressão à quente, que consiste na utilização de uma prensa, onde o material é prensado em um molde através da aplicação de calor e pressão. Esse calor aplicado durante a moldagem deve ser adequado ao tipo de material utilizado, para assim obter misturas homogêneas e sem ocorrência de degradação, como é o caso das fibras vegetais que degradam em altas temperaturas (MÜLLER, R. L., MÜHLMANN, C. M., RODRIGUEZ, A. L., *et al*, 2007).

Dessa forma, este trabalho apresenta o desenvolvimento de compósitos de polietileno de baixa densidade (PEBD) reforçados com diferentes proporções de fibras de cana-de-açúcar na sua forma *in natura* e modificada, de modo a avaliar suas propriedades mecânicas.

## 2 OBJETIVO

### 2.1 Objetivo geral

Obter um compósito com matriz de PEBD e reforço de fibras de cana-de-açúcar *in natura* e modificada, assim como a caracterização de suas propriedades mecânicas.

### 2.2 Objetivos específicos

- Obter o compósito de PEBD com fibra de cana-de-açúcar *in natura* e modificada;
- Caracterizar mecanicamente compósitos de PEBD reforçados com fibra de cana-de-açúcar a partir do ensaio de tração.



### 3 JUSTIFICATIVA

O Brasil apresenta uma ampla atividade agrícola, produz e comercializa diversos tipos de fibras naturais, sendo a cana-de-açúcar o maior subproduto da indústria sucroalcooleira. Durante a produção do açúcar e do álcool são gerados uma grande quantidade de resíduos, como o bagaço da cana-de-açúcar. Geralmente, este resíduo é destinado a queima em caldeiras para cogeração de energia elétrica, processo que emite gases poluentes na atmosfera, prejudicando o meio ambiente. Dessa forma, este trabalho propõe novas rotas de reaproveitamento dos bagaços de cana-de-açúcar, utilizando-o como reforço em uma matriz polimérica a fim de reduzir o impacto ambiental.

Além disso, como a safra de cana-de-açúcar no Brasil é elevada durante praticamente todo o decorrer do ano, a disponibilidade desta matéria-prima não é uma dificuldade, facilitando a sua utilização. Outra motivação são as inúmeras vantagens que as fibras naturais possuem em relação as fibras sintéticas como biodegradabilidade, baixo custo, baixa toxicidade e baixa densidade, podendo ser utilizadas como reforços em diversos polímeros.

A matriz termoplástica quando sujeita a uma determinada temperatura se deforma facilmente, podendo posteriormente ser reciclada. Assim, a produção de compósitos termoplásticos reforçados com fibras naturais é de grande interesse econômico, com aplicações em diversas áreas. Neste trabalho, utilizou-se o polietileno de baixa densidade como matriz, pois possui temperatura de processamento menor que a temperatura de degradação das fibras, baixo custo e boa processabilidade quando comparada aos demais polímeros.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 Polietileno de baixa densidade (PEBD)

Os polietilenos são polímeros parcialmente cristalinos e tem suas propriedades influenciadas pela quantidade relativa da fase amorfa, em que as cadeias macromoleculares são desorganizadas, e da fase cristalina, cujas cadeias poliméricas são organizadas. Dependendo das condições reacionais e do catalisador empregado, podem ser produzidos alguns tipos diferentes de polietilenos, dentre eles o polietileno de baixa densidade (RIBEIRO, 2014).

O PEBD tem um baixo grau de cristalinidade, devido à presença de ramificações de cadeias (Figura 1), ou seja, existem cadeias laterais fora da cadeia principal do polímero. As ramificações alteram a simetria da cadeia principal e reduzem as forças atrativas entre as cadeias do polímero, sendo conduzido a uma estrutura menos compacta, que acarreta em uma menor densidade e resistência mecânica (BARBOSA et al., 2016).

Figura 1 - Representação esquemática da estrutura molecular do PEBD



Fonte: Adaptado de Mesquita (2011, p.20)

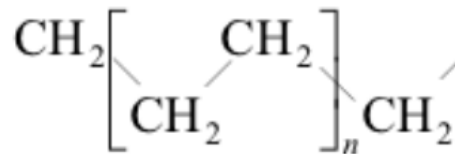
Tais ramificações desfavorecem o ordenamento das moléculas durante a cristalização. O PEBD atinge valores de cristalinidade na ordem de 40% a 65%, enquanto o polietileno de alta densidade (PEAD), atinge cristalinidade entre 85% a 95%, sendo um polímero de características linear, sem ramificações (RIBEIRO, 2014).

Por conta das ramificações presentes no PEBD que influenciam na redução da cristalinidade, tem-se um polímero flexível com ponto de fusão baixo. Assim, ramificações longas podem conferir características desejáveis de processamento e também uma viscosidade relativamente baixa. Em contrapartida conforme a cristalinidade aumenta, o módulo elástico, a resistência ao escoamento, a dureza, a

densidade, a fragilidade e a temperatura de fusão também aumentam (BARBOSA et al., 2016).

A estrutura cristalina do PEBD é constituída pela repetição do monômero  $(CH_2)_n$  e finalizada com grupos  $CH_3$ , conforme Figura 2. A temperatura de fusão do PEBD é 135 °C, a temperatura de transição vítrea é um valor de -125 °C e a de processamento é na faixa de 149 até 232 °C (BARBOSA et al., 2016).

Figura 2 - Polímero polietileno



Fonte: Barbosa (2016, p.5)

O PEBD é utilizado na aplicação de filmes, frascos, embalagens, sacolas, brinquedos, tubo de caneta esferográfica, entre outros. Isso se deve as suas características de fácil processamento, o seu baixo custo e por apresentar boa tenacidade, resistência ao impacto e flexibilidade. A densidade do PEBD varia de 0,92 a 0,94 g/cm<sup>3</sup>, sendo a massa molar em torno de 50000 g/mol e o mesmo pode ser translúcido ou opaco (RIBEIRO, 2014).

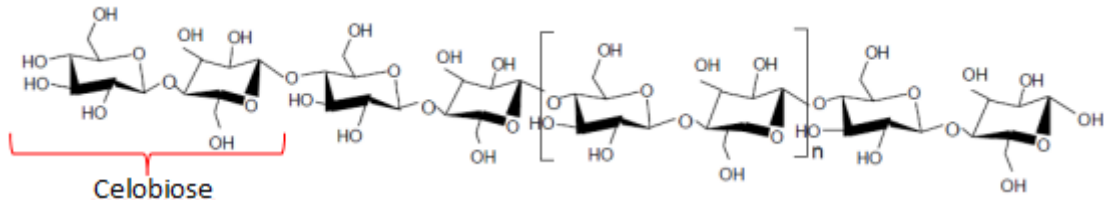
#### 4.2 Fibras naturais

As fibras naturais também são denominadas de fibras vegetais e lignocelulósicas, sendo classificadas conforme sua origem na planta. Podem ser fibras extraídas das sementes das plantas (algodão), do caule (juta, cana de açúcar, linho, rami), das folhas (sisal, caroá) e dos frutos (coco) (ESMERALDO, 2006; OLIVEIRA, 2013).

Basicamente, essas fibras são constituídas de celulose, lignina e hemicelulose, além de possuir teores menores de outros componentes, como, açúcares livres, produtos inorgânicos, pectina, proteínas e extrativos. Vale a pena destacar a importância da celulose, que por meio do alto grau de polimerização e orientação molecular, proporciona a fibra uma elevada estabilidade e resistência. A celulose, cuja fórmula geral é  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , encontra-se classificada como polissacarídeo, formado por várias moléculas de  $\beta$ -glicose. A Figura 3 representa a

estrutura da celulose, constituída por unidades repetitivas de celobiose, que são interligadas por ligações glicosídicas do tipo  $\beta$  (1-4) (ALBINANTE; PACHECO; VISCONDE, 2013; OLIVEIRA, 2013; FARIAS, 2012).

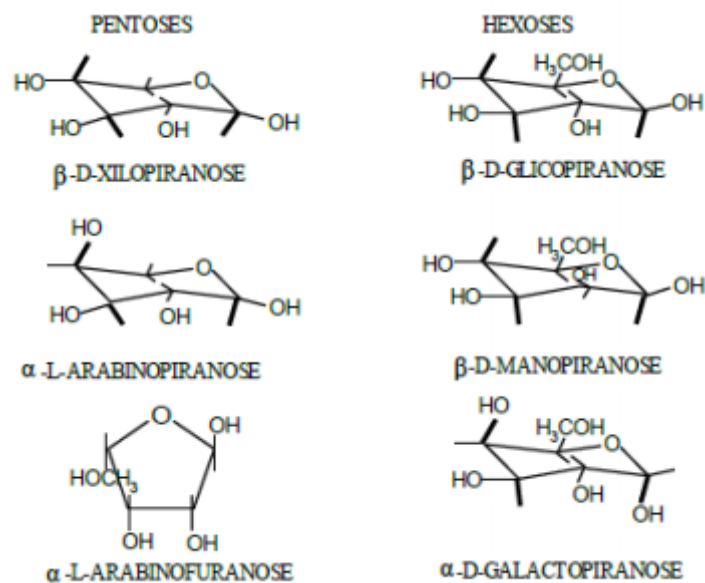
Figura 3 - Estrutura molecular da celulose



Fonte: Adaptado de Farias (2012, p. 17)

Assim como a celulose, a hemicelulose também é considerada um polissacarídeo, formado por um grau de polimerização bem menor que a da celulose, em torno de um décimo a um centésimo. A hemicelulose é constituída por variadas unidade de açúcar (ESMERALDO, 2006; FARIAS, 2012). A Figura 4 apresenta alguns componentes da hemicelulose.

Figura 4 - Alguns componentes presentes na hemicelulose

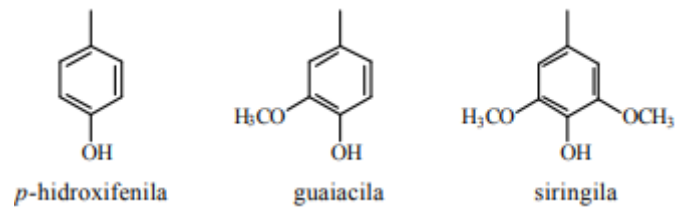


Fonte: Farias (2012, p. 18)

A lignina é um material amorfo, responsável pelo enrijecimento da parede celular, que fornece tanto resistência ao tecido celular como as fibras. Os constituintes da lignina são os grupos aromáticos e alifáticos, formadores da parede celular devido

à união das fibras celulósicas. A estrutura da lignina quando comparada a celulose e hemicelulose é mais complexa, pois possuem diversos arranjos entre as suas unidades precursoras (PAULA, 2011; WEBER, 2018). Na Figura 5 estão apresentadas as unidades p-hidroxifenila, guaiacila e siringila, presentes na molécula de lignina.

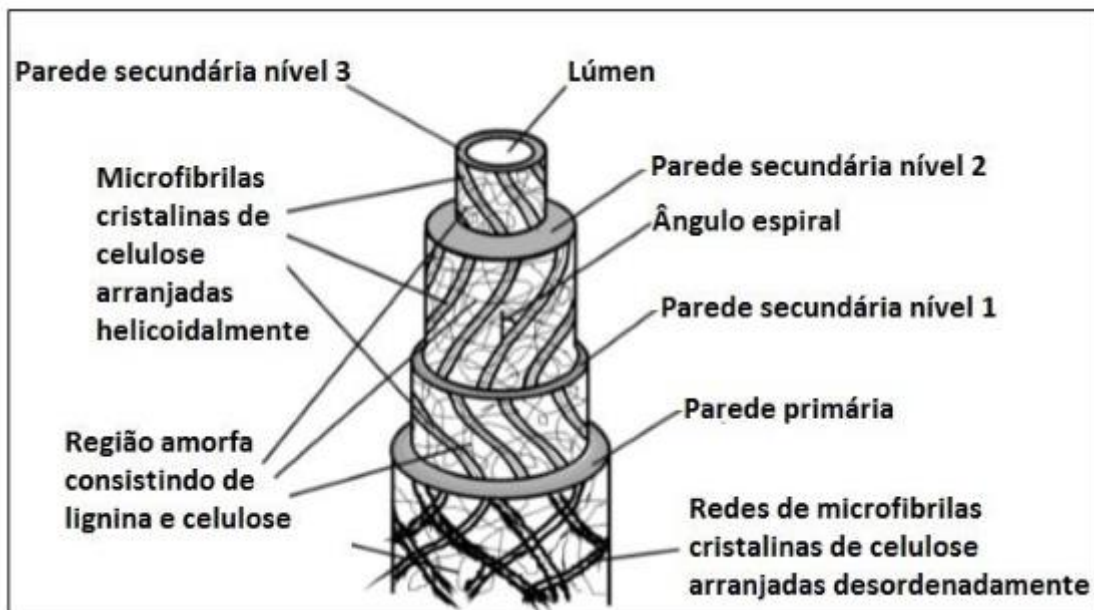
Figura 5 - Principais unidades aromáticas presente na estrutura da lignina



Fonte: Santos (2001, p. 480)

As fibras vegetais são consideradas hidrofílicas devido à grande quantidade de celulose e hemicelulose em sua composição e são estruturalmente constituídas de células individuais, sendo estas compostas por microfibrilas, que se encontram arranjadas em camadas com espessuras e ângulos de orientação diferentes. As fibras são consideradas um compósito, possuindo matriz de lignina e hemicelulose onde são incorporadas as microfibrilas (FONSECA, 2012; SCHMIDT, 2016). A Figura 6 apresenta a estrutura de uma fibra vegetal.

Figura 6 - Desenho esquemático da estrutura de uma fibra vegetal



Fonte: Schmidt (2016, p. 22)

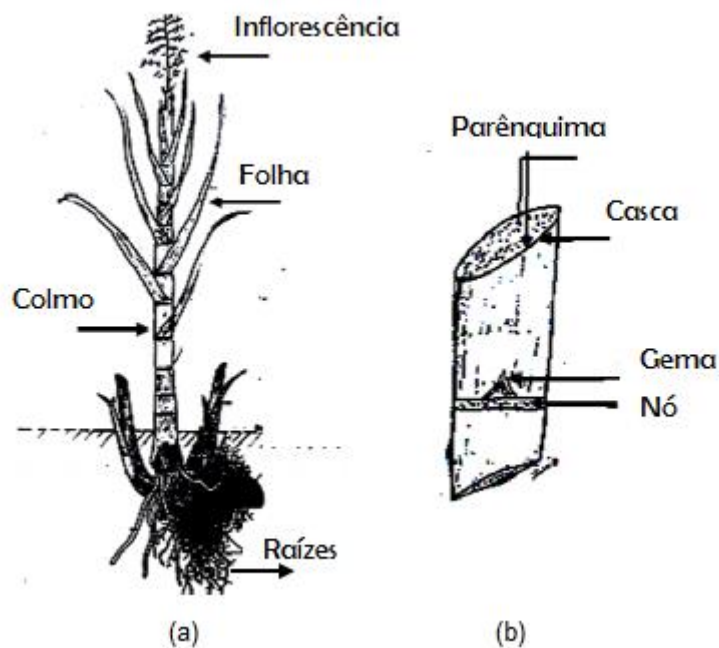
A composição das fibras vegetais e suas propriedades mecânicas podem variar devido às condições climáticas, a idade e plantio da planta, assim como o local em que as fibras são retiradas da planta. No material compósito as propriedades mecânicas são influenciadas pelo grau de adesão entre a matriz e as fibras (PAULA, 2011; SCHMIDT, 2016).

#### 4.2.1 Fibras de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar, com nome científico de *Saccharum officinarum*, teve sua origem no sudeste asiático e é pertencente à família da Poaceae. No Brasil, a cana-de-açúcar surgiu em meados do século XVI, devido ao colonialismo europeu (OLIVEIRA; BARROS, 2017).

A planta de cana-de-açúcar é composta basicamente por raízes, colmo, folhas e inflorescências, sendo o colmo a parte mais importante, formado por nós, gemas e gomos (QUINELATO, 2016). O colmo, também denominado de caule, é o responsável pelo crescimento e desenvolvimento da planta, sendo nele armazenado o açúcar da cana. Os nós são encarregados de dar o suporte as folhas e a inflorescência (flores) (TUTA, 2013). Na Figura 7 abaixo está apresentada os componentes constituintes da morfologia da cana-de-açúcar.

Figura 7 - Morfologia da planta cana-de-açúcar: (a) Raízes, colmo, folha e inflorescência; (b) Colmo, constituído por nó, gema, casca e parênquima



Fonte: Adaptado de Quinelato (2016, p. 23)

A fibra de cana-de-açúcar extraída do colmo possui todos os constituintes presentes nos colmos. O teor da fibra de cana sofre influência de vários fatores, como condições climáticas, umidade e fertilidade do solo, período de colheita e método de determinação da porcentagem de fibra. Assim, seu teor pode variar entre 10 e 11% (SANTANA, 2012).

A Tabela 1 a seguir apresenta algumas características e propriedades principais das fibras de bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 1 - Características e propriedades da fibra de bagaço de cana-de-açúcar

Fibra	Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Diâmetro da fibra (mm)	Comprimento da fibra (mm)	Resistência à tração (Mpa)	Módulo de elasticidade (Gpa)
Bagaço de cana-de-açúcar	300 – 400	0,20 – 0,40	50 – 300	170 – 290	15 - 19

Fonte: Adaptado de Sarmiento (1996, p. 21)

Além do teor de fibra na cana-de-açúcar, a porcentagem de composição química também sofre variações devido à existência de grande variedade de cana e o local de cultivo. A fibra de cana é constituída basicamente por 41-44% de celulose,

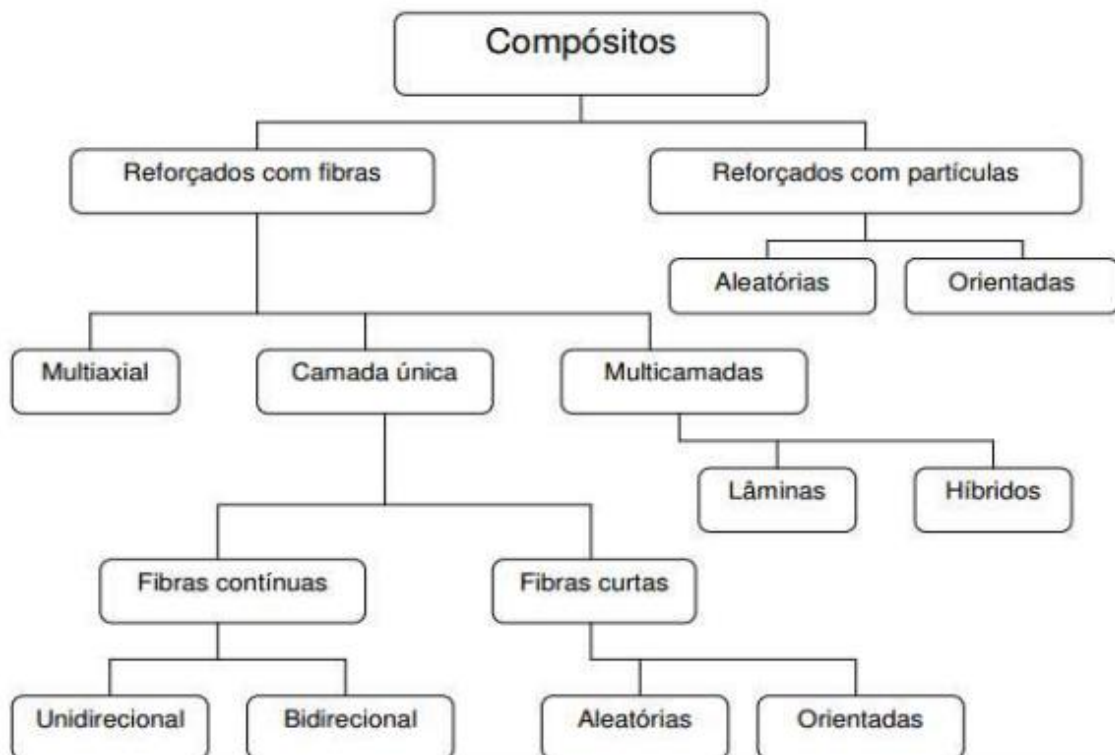
localizada na parede celular da cana, 25-27% de hemicelulose, 20-22% de lignina e o restante de cinzas, produzidas na queima do bagaço (LINO, 2015).

### 4.3 Compósitos

O compósito pode ser considerado como um material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal forma que é obtida uma combinação melhor de propriedades. Então, melhores combinações de propriedades são criadas pela junção de dois ou mais materiais distintos (CALLISTER Jr., 2008).

Quanto à classificação dos materiais compósitos a literatura apresenta diversos tipos conforme o tipo de matriz, a geometria e fase dispersa. A Figura 8 mostra um tipo de classificação dos materiais compósitos.

Figura 8 - Classificação dos materiais compósitos



Fonte: Milani (2015, p. 8)

Portanto, uma característica fundamental dos compósitos é a combinação macroscópica de duas fases distintas conhecidas como matriz e reforço, sendo que a fase reforço fica dispersa na fase matriz. Compósitos estruturais com matrizes



poliméricas são materiais de grande interesse para aplicações em engenharia devido à baixa massa específica aliada à alta resistência mecânica (CALLISTER Jr., 2008).

#### 4.3.1 Compósitos reforçados com fibras naturais

Uma das finalidades da utilização de fibras naturais em um compósito é fazer com que o mesmo atue como uma carga de material reciclável e de baixo custo. As fibras naturais de origem vegetal envolvem aspectos ambientais, sociais e econômicos. Elas são advindas de uma fonte de matéria-prima renovável o que é muito significativo atualmente (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

#### 4.3.2 Matrizes termoplásticas

Os polímeros termoplásticos são uma alternativa de aplicação em estruturas por conta da maior tenacidade à fratura, maior resistência ao impacto e tolerância a danos, devido a menor absorção de umidade em relação aos termorrígidos. Essa classe de polímeros tem alta massa molar, cadeias lineares e às vezes alguma ramificação. O emaranhamento das cadeias permite que o material apresente integridade física passíveis de deformação plástica quando submetidos a tensões. No processamento desse tipo de compósito, processos convencionais, como extrusão e injeção, podem ser usados. O processamento de compósitos com matriz termoplástica é realizado de forma que o polímero seja incorporado ao reforço ainda no estado sólido (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

### 4.4 Técnica de caracterização

#### 4.4.1 Ensaio de Tração

Com a necessidade de analisar, detectar e compreender falhas e propriedades dos inúmeros tipos de materiais e produtos existentes, em situações diversas, foram desenvolvidos os ensaios mecânicos destrutivos e os não destrutivos, cada um com sua finalidade específica. Os ensaios destrutivos são utilizados a fim de determinar as propriedades mecânicas dos materiais e aferir sua capacidade de suportar uma determinada carga. Já os ensaios não destrutivos servem para detectar

falhas e para testes de controle de qualidade (MENDES; SILVEIRA, 2018). A Tabela 2 apresenta a classificação dos ensaios destrutivos e não destrutivos.

Tabela 2 - Classificação dos ensaios dos materiais

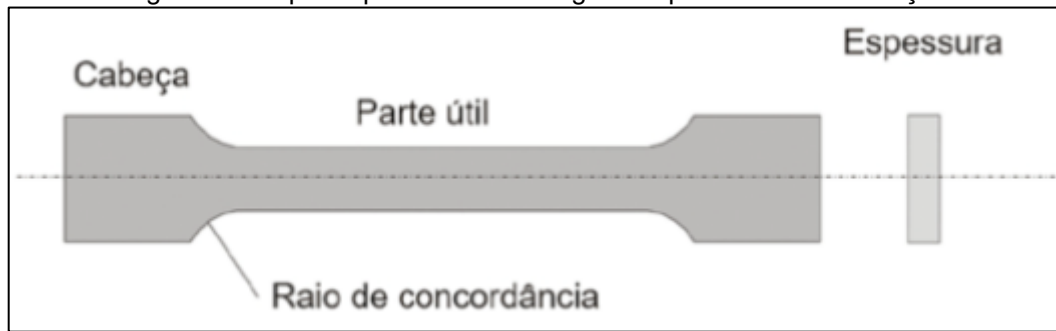
<b>Ensaio destrutivo</b> (Provocam inutilização parcial ou total da peça)	<b>Ensaio não destrutivo</b> (Não comprometem a integridade da peça)
Tração	Radiografia com raios X
Dureza	Radiografia com raios $\gamma$
Fadiga	Ultrassom
Fluência	Partículas magnéticas
Torção	Líquidos penetrantes
Flexão	
Tenacidade à fratura	

Fonte: Adaptado de Garcia; Spim; Santos (2008, p. 5)

Dentre os diversos tipos de ensaios destrutivos para avaliação das propriedades mecânicas dos materiais, o mais utilizado devido a facilidade e simplicidade é o ensaio de tração. Com essa técnica é possível obter dados quantitativos das características mecânicas dos materiais utilizados em projetos de engenharia e fabricação de componentes. O levantamento dos dados é obtido seguindo normas técnicas convencionais específicas do material de ensaio e os resultados podem ser influenciados por vários fatores, como condições ambientais, velocidade de deformação, temperatura ambiente, quantidade de impurezas, etc (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2008).

Em um ensaio mecânico de tração, um corpo de prova específico é fixado nas garras da máquina, onde o mesmo é submetido a aplicação de uma carga gradativa de tração até o momento de sua ruptura. Esses corpos de prova utilizados no ensaio são fabricados com uma seção transversal maior nas extremidades e menor na região útil do corpo de prova, a fim de provocar a ruptura do material em uma seção onde as tensões não sofrem modificações pelas garras da máquina (MENDES; SILVEIRA, 2018). A Figura 9 mostra o formato e as regiões do corpo de prova.

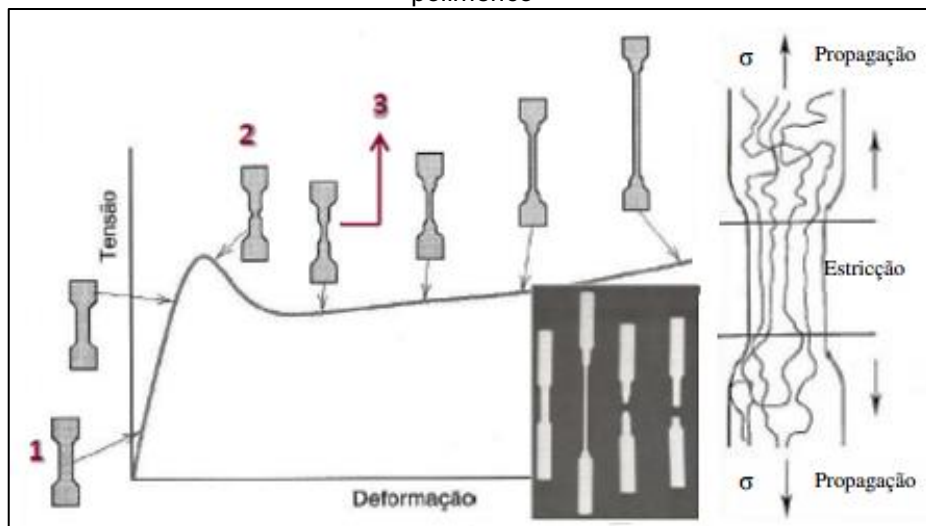
Figura 9 - Corpo de prova no formato gravata para o ensaio de tração



Fonte: Mendes; Silveira (2018, p. 32)

Após o ensaio e a realização de um tratamento adequado dos resultados adquiridos, obtém-se uma curva de tensão versus deformação do corpo de prova ensaiado, onde com o auxílio de algum software de análise de dados e gráficos, os dados quantitativos das características mecânicas dos materiais são extraídos da curva. Os principais dados são: limite de resistência à tração ( $\sigma_{\mu}$ ), limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) e módulo de elasticidade (E) (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2008). A Figura 10 apresenta uma curva tensão versus deformação esquemática do comportamento mecânico de um material polimérico.

Figura 10 - Curva esquemática tensão-deformação do comportamento mecânico de um material polimérico



Fonte: Pacheco (2014, p.37)

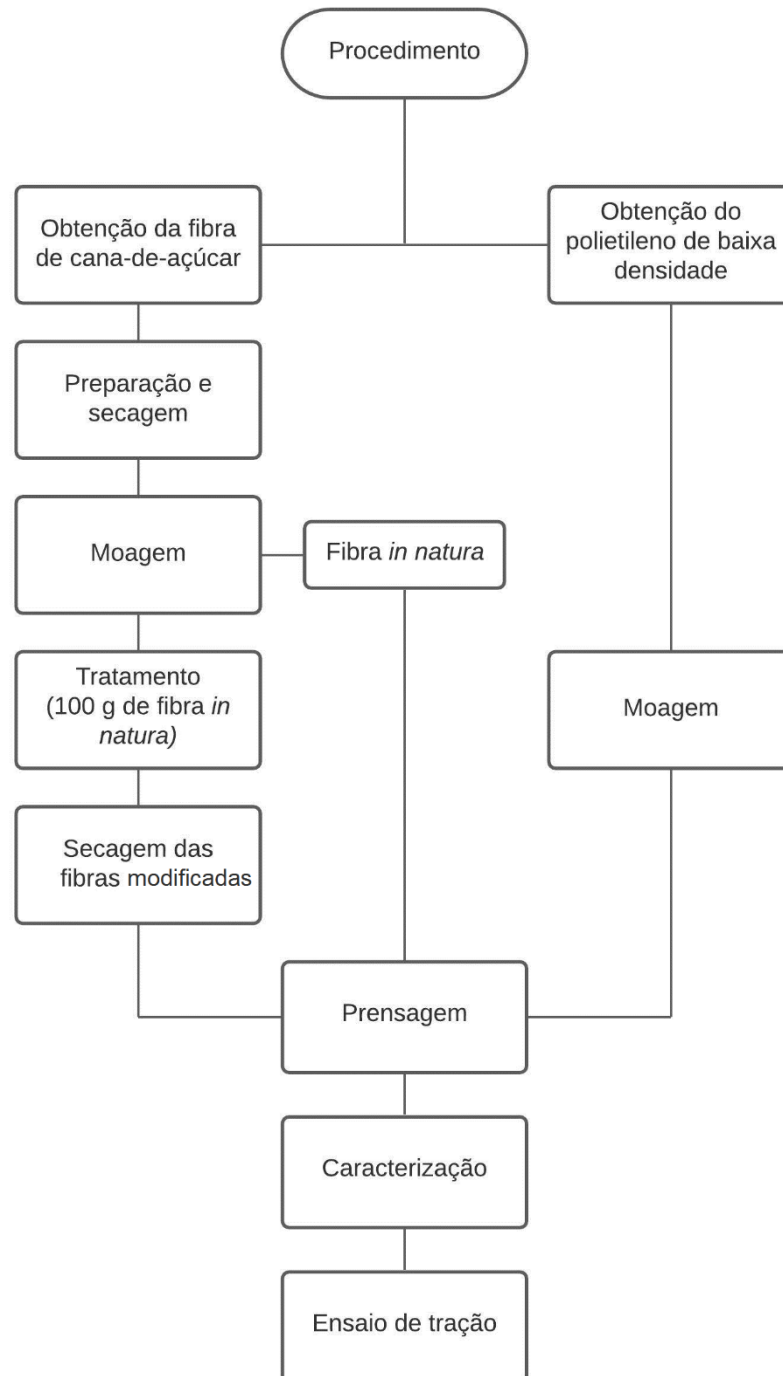
A Figura 10 apresenta os perfis do corpo de prova em vários estágios de deformação, onde no ponto 1 o corpo de prova está conforme o padrão, iniciando a região linear, que corresponde a deformação elástica do material. No ponto 2,

encontra-se o início da formação do pescoço na secção útil do corpo de prova, nessa região está localizado o limite de escoamento, em que é determinado o fim da região elástica e o início da região plástica. Um pouco mais adiante, no ponto 3 está apresentado o limite de resistência a tração, em que se tem uma continuidade da deformação e a propagação da estrição (PACHECO, 2014; CALLISTER, 2008).

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental utilizado neste trabalho está descrito na Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma do procedimento experimental utilizado neste trabalho



Fonte: Autoria própria.

## 5.1 Obtenção e preparação das fibras

As fibras do bagaço de cana-de-açúcar foram cedidas por um vendedor de caldo de cana, localizado na cidade de Cambé.

Como as fibras encontravam-se úmidas, as mesmas foram expostas ao sol durante 48 horas para serem secas. Após, as fibras foram separadas e limpas, sendo cortadas no comprimento de aproximadamente 5 cm, conforme Figura 12, e armazenadas em sacos plásticos.

Figura 12 - Fibras do bagaço de cana-de-açúcar cortadas em aproximadamente 5 cm



Fonte: Autoria própria.

### 5.1.1 Moagem das fibras

Após o processo de obtenção e preparação das fibras, estas foram levadas para o processo de moagem, a fim de reduzir a granulometria do material para assim incorporá-lo com o polietileno de baixa densidade (PEBD) para a produção do compósito. Este processo foi realizado no moinho de facas tipo Willye Star FT 50 da marca Fortinox (velocidade do rotor de 1750 rpm) com peneiras em aço inox de mesh 20, apresentada na Figura 13.

Figura 13 - Moinho de facas tipo Willye Star FT 50



Fonte: Autoria própria.

### 5.1.2 Tratamento das fibras

Cerca de 100 g de fibras do bagaço de cana-de-açúcar *in natura* foram submetidas a um processo de lavagem para extração do açúcar e outros possíveis resíduos. Para isso, utilizou dois béqueres de 1000 ml contendo 800 ml de água, aquecida por chapas aquecedoras e controlada por termômetros digitais na faixa de 75-85 °C, durante 1h e 30 min, sem agitação mecânica. Na Figura 14 é demonstrado este processo.

Figura 14 - Processo de extração do açúcar da fibra e outros resíduos



Fonte: Autoria própria.

Após, as fibras foram filtradas em uma peneira 420 mm/ $\mu$ m (35 mesh) para eliminar a água (Figura 15).

Figura 15 - Fibras filtradas na peneira de 420 mm/ $\mu$ m



Fonte: Autoria própria.

### 5.1.3 Secagem das fibras

Após o processo de tratamento das fibras *in natura*, estas foram divididas em três porções, sendo colocadas em béqueres e levadas a estufa à vácuo SL 104/30 da



marca Solab à 60° C (Figura 16), durante 24 horas. Mas, após esse tempo notou-se que as fibras continuavam úmidas.

Figura 16 - Estufa à vácuo SL 104/30



Fonte: Autoria própria.

Assim, as fibras modificadas foram espalhadas em uma forma retangular e encaminhadas para a estufa microprocessada à 80 °C, durante 24 horas, para terminar o processo de secagem. A Figura 17 apresenta a estufa microprocessada utilizada.

Figura 17 - Estufa microprocessada



Fonte: Autoria própria.

## 5.2 Obtenção do polietileno de baixa densidade

O polímero (PEBD BC818) em formato de pellets utilizado neste estudo é fabricado pela empresa Braskem S/A, o qual possui uma densidade equivalente a  $0,918 \text{ g/cm}^3$  e um índice de fluidez de  $8,3 \text{ g/10 min}$ , podendo assim ser submetido a diversas aplicações devido à suas boas propriedades e fácil processabilidade, como exemplo, moldagem por injeção e extrusão em geral (BRASKEM, 2021). A Figura 18 demonstra os pellets de PEBD da Braskem.

Figura 18 - Pellets de PEBD



Fonte: Autoria própria.

### 5.2.1 Moagem do polietileno de baixa densidade

O polímero utilizado, polietileno de baixa densidade (PEBD) foi levado para o moinho de facas tipo Willye Star FT 50 da marca Fortinox com peneiras em aço inox de mesh 30, para reduzir a granulometria do mesmo. Com a redução de sua granulometria, a incorporação da fibra de cana de açúcar na matriz polimérica é melhorada, além de facilitar a fundição do polímero no processo de prensagem.

### 5.3 Preparação dos compósitos

Para preparação dos compósitos, utilizou-se as fibras *in natura* e o PEBD moídos, além também das fibras modificadas, obtidas conforme descrito em tópicos anteriores. Estes materiais moídos foram pesados de acordo com as proporções de fibras a serem usadas, sendo posteriormente acondicionadas em sacos plásticos para obter uma melhor incorporação das fibras à matriz. A Tabela 3 apresenta as diferentes formulações utilizadas na produção dos compósitos, sendo quatro formulações com proporções diferentes de fibra *in natura* e quatro contendo proporções diferentes de fibras modificadas, e por fim, uma formulação de PEBD puro.

Tabela 3 - Descrição das formulações utilizadas na produção dos compósitos

Amostra	Tipo de fibra reforçada	Quantidade PEBD (% m/m)	Quantidade fibra (% m/m)
PEBD Puro	-	100	0
CPN1 5%	Fibra <i>in natura</i>	95	5
CPN2 10%	Fibra <i>in natura</i>	90	10
CPN3 15%	Fibra <i>in natura</i>	85	15
CPN4 20%	Fibra <i>in natura</i>	80	20
CPM1 5%	Fibra modificada	95	5
CPM2 10%	Fibra modificada	90	10
CPM3 15%	Fibra modificada	85	15
CPM4 20%	Fibra modificada	80	20

CPN (compósito reforçados com fibras de cana-de-açúcar *in natura*); CPM (compósito reforçados com fibras de cana-de-açúcar modificada)

Fonte: Autoria própria.

### 5.4 Prensagem

Para produzir os corpos de prova (CP), a mistura obtida anteriormente de fibras em diferentes proporções na matriz polimérica, foram submetidas a um processo de prensagem, que consiste numa moldagem por compressão. Para isso, utilizou-se a prensa hidráulica com aquecimento e resfriamento (15 toneladas) da marca Marconi (Figura 19), conformando o material em formato de placas.

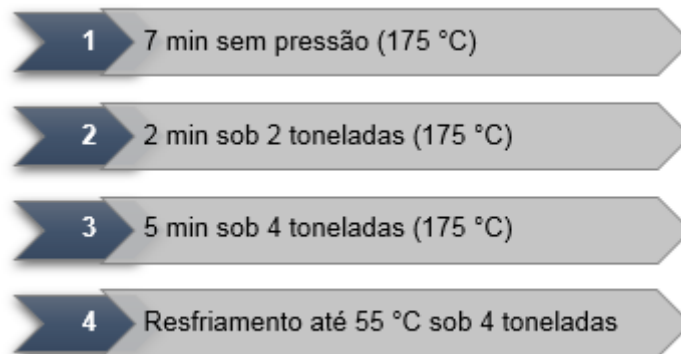
Figura 19 - Prensa hidráulica utilizada no processo de prensagem



Fonte: Autoria própria.

As placas foram produzidas seguindo quatro etapas e alguns parâmetros, conforme descrito na Figura 20. Inicialmente, o material foi submetido à 175 °C por sete minutos, sem aplicar pressão. Em seguida, aplicou-se uma pressão de duas toneladas por dois minutos. Depois, foi aplicada uma pressão de quatro toneladas por cinco minutos. Por último, sofreu um resfriamento lento até as placas atingirem 55 °C sob pressão de quatro toneladas e após esse período o material foi retirado da prensa. Esse processo foi repetido várias vezes.

Figura 20 - Parâmetros utilizados no processo de prensagem



Fonte: Autoria própria.

Após a produção das placas de compósitos, os corpos de prova foram retirados das placas com auxílio de uma ferramenta denominada cunha, ou estampo de aço temperado, em formato gravata (padronizado). A Figura 21 apresenta a sequência realizada para retirar os corpos de prova das placas produzidas em diferentes composições.

Figura 21 - Produção dos corpos de prova. (A) Placa de compósito PEBD reforçado com fibras de cana-de-açúcar; (B) Placa com cunha para retirar o corpo de prova; (C) Retirando corpo de prova com a cunha na prensa; (D) Corpos de prova



Fonte: Autoria própria.

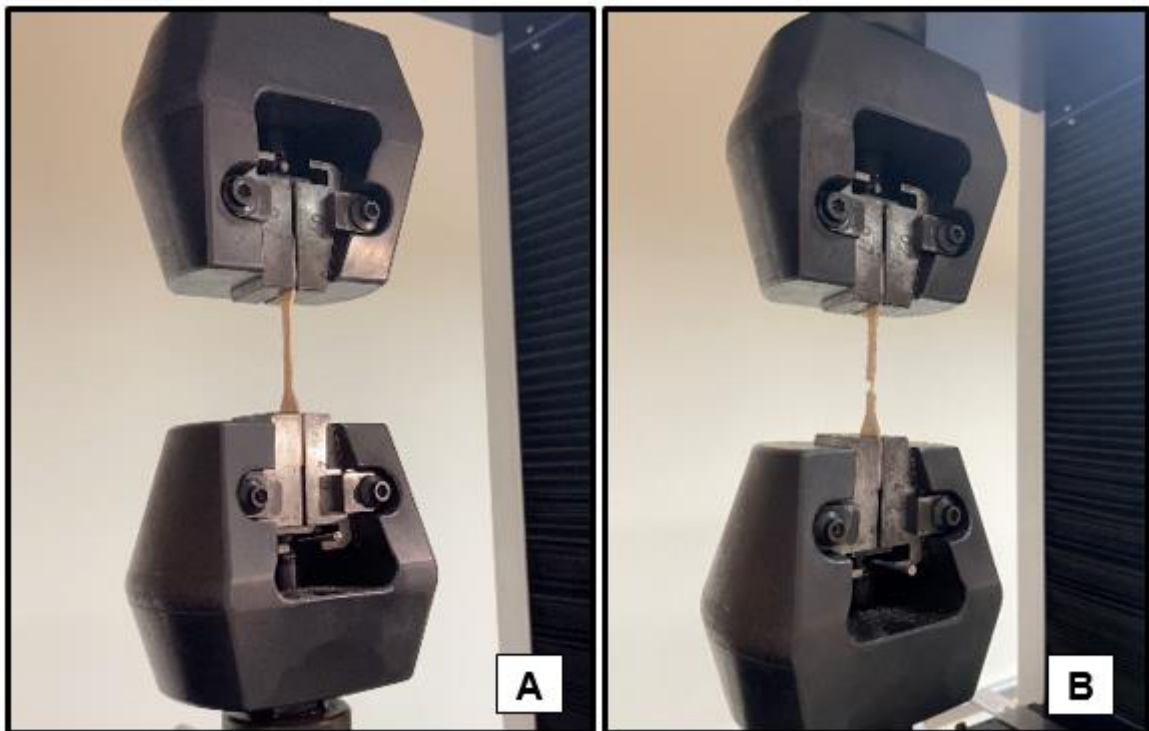
## 5.5 Caracterização Mecânica

### 5.5.1 Ensaio de Tração

Todos os corpos de prova produzidos anteriormente em diferentes composições foram submetidos ao ensaio de tração, realizado na máquina universal

de ensaios mecânicos, marca Time Group, modelo WDW - 100E. Foram ensaiados 3 corpos de prova de cada composição, sob o mesmo parâmetro, totalizando 27 corpos de prova. O ensaio foi realizado no laboratório de ensaios do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina, seguindo a norma ASTM D638-14, com velocidade de ensaio de 10 mm/min. A Figura 22 a seguir apresenta o ensaio realizado em um dos corpos de prova.

Figura 22 - Ensaio de tração. (A) Corpo de prova fixado no equipamento, antes do ensaio; (B) Corpo de prova após ensaio



Fonte: Autoria própria.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Preparação das fibras e do polímero

Foi necessário realizar o processo de moagem com paradas programadas entre os ciclos devido ao aquecimento do equipamento, por conta da força de atrito presente. Esta é uma força dissipativa ou seja, uma força capaz de transformar energia mecânica em energia térmica. A Figura 23 mostra o processo de moagem da fibra de cana-de-açúcar.

Figura 23 - Processo de moagem da fibra de cana-de-açúcar



Fonte: Autoria própria.

A temperatura de fusão do PEBD é em torno de 135 °C e o açúcar tende a iniciar sua caramelização em uma temperatura próxima de 145 °C. Assim, para evitar a fusão do polímero e a caramelização do açúcar no equipamento durante o processo

de moagem, o mesmo era mantido em operação por quatro minutos. Em seguida, era desligado, realizava-se uma limpeza com um jato de ar e por fim acontecia seu resfriamento em temperatura ambiente, com duração de aproximadamente três minutos. Após, o equipamento era ligado e o processo se repetia. Com isso, teve-se um processo de moagem sem danos por contaminação ao moinho de facas e sem alterações nas amostras.

## 6.2 Tratamento das fibras

Durante o processo de infusão de uma determinada quantidade de fibras *in natura*, notou-se a mudança de coloração da água indicando visualmente a saída de açúcar e outros compostos da fibra, como desejado. Além disso, observou-se a presença de três fases nessa mistura por conta da decantação, sendo que em cima estava o líquido de coloração marrom com os solúveis eliminados das fibras, no meio encontravam-se as fibras de partículas menores misturadas com o líquido escuro e embaixo, em uma maior quantidade encontravam-se as fibras de partículas maiores (Figura 14).

Na primeira secagem dessas fibras modificadas, notou-se que elas ainda estavam úmidas, isso aconteceu pois elas foram colocadas na estufa em béqueres que dificultaram a eliminação do líquido por se ter baixa superfície de contato com o ar, conforme Figura 24. A solução encontrada foi utilizar uma assadeira metálica que permitiu dispor as fibras em uma camada mais fina e conseqüentemente, facilitando a eliminação da umidade residual. Além disso, trocou-se de estufa por conta do recipiente ser maior que os béqueres.



Figura 24 - Fibras modificadas após a primeira secagem

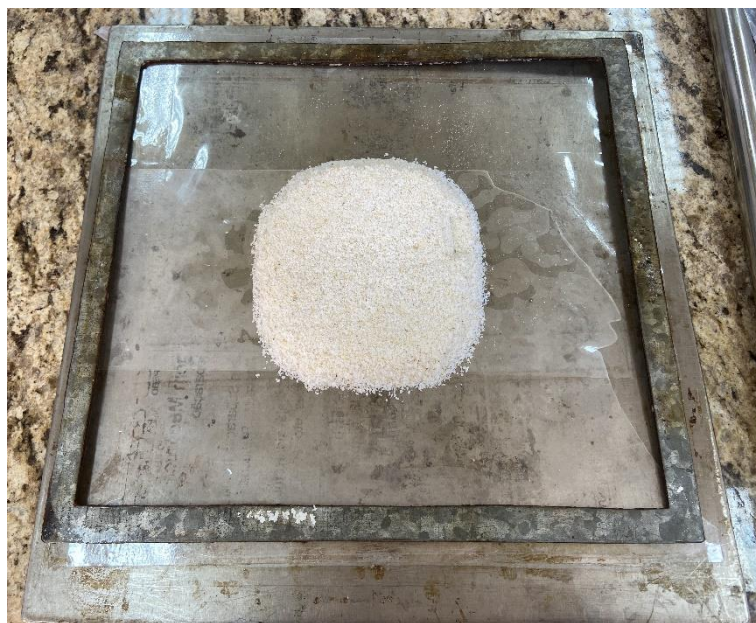


Fonte: Autoria própria.

### 6.3 Prensagem compósito PEBD com fibra de cana-de-açúcar

A mistura do PEBD moído com o bagaço de cana-de-açúcar também moído, foi feita manualmente. Tal mistura foi colocada entre duas placas de aço, como uma estrutura sanduíche, além disso entre a mistura e as placas usou-se folhas poliméricas para evitar a contaminação e a adesão dos compostos ao metal. Em seguida, essa estrutura foi levada para a prensa, conforme Figura 25.

Figura 25 - Placa de aço com mistura de PEBD/fibra de cana-de-açúcar



Fonte: Autoria própria.

Para que o processo de prensagem fosse realizado com êxito, com uma mistura fundida por completo, testes preliminares foram realizados para obter valores de tempo, pressão e temperatura adequados. Durante os testes de prensagem, os valores de temperatura e pressão foram alterados, bem como o tempo de aplicação de carga, até se obter valores satisfatórios desses parâmetros para serem aplicados.

As placas de compósitos foram preparadas utilizando as proporções descritas na Tabela 3, sendo que uma placa de cada proporção foi conformada, a fim de analisar a influência da proporção da fibra na matriz e a sua forma utilizada, *in natura* ou modificada, nas propriedades. A obtenção do compósito de PEBD com reforço de fibra de cana-de-açúcar *in natura* e modificada foi satisfatória.

A partir da Figura 26 é possível observar uma placa de compósito PEBD com 20% de fibra de cana-de-açúcar *in natura*, no qual nota-se bordas mais esbranquiçadas e a região central com uma boa dispersão das fibras na matriz, isso por conta do escoamento dos pellets de PEBD para a borda, que acontece no início da prensagem.

Figura 26 - Compósito de PEBD com 20% de fibra de cana-de-açúcar *in natura*

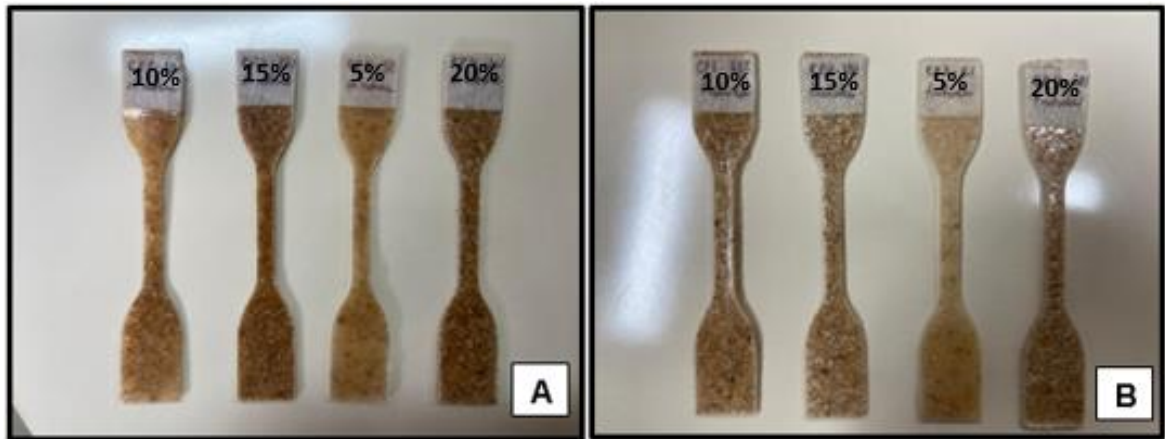


Fonte: Autoria própria.

Ao verificar os corpos de prova obtidos (Figura 27), percebe-se que as fibras encontram-se visualmente bem distribuídas por todo o corpo de prova. Isso se deve a

um processo de prensagem eficiente e a escolha de uma boa região das placas fabricadas para realizar o corte das amostras.

Figura 27 - Corpos de prova com fibras de cana de açúcar: (A) *in natura*; (B) modificada



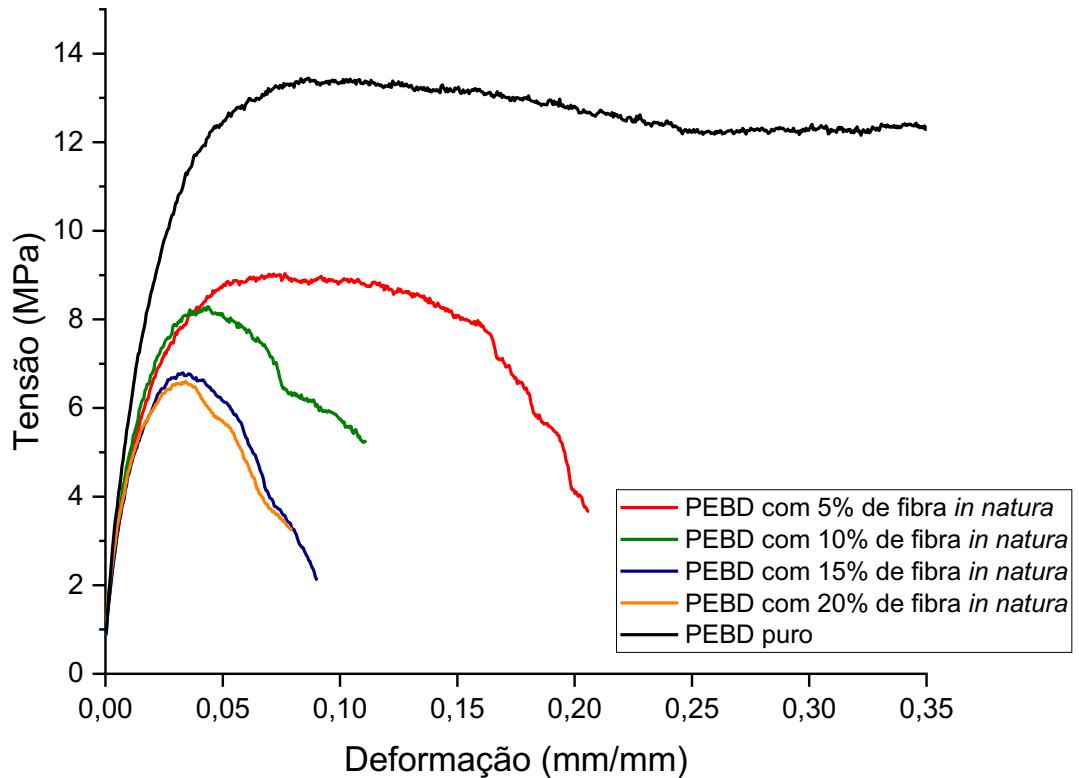
Fonte: Autoria própria.

Além disso apresentaram uma mudança de coloração com a variação do percentual de fibras, sendo que quanto maior este valor, mais escuro é o corpo de prova, devido a maior quantidade de fibras ocupando o espaço. Além disso, observa-se que os corpos de prova da Figura 27 (B), que são os compósitos com fibras de cana-de-açúcar modificada, apresentaram uma coloração mais clara. Isso se deve ao tratamento realizado na fibra, que permite a retirada de açúcares e solúveis, por meio da presença de água em temperatura controlada, garantindo a saída desses elementos. Isso é possível devido ao elevado teor de umidade das fibras que permite o uso de uma menor temperatura para o amolecimento das cadeias dos compostos extraídos.

#### 6.4 Propriedades mecânicas

As Figuras 28 e 29 apresentam as curvas tensão x deformação para o PEBD puro e seus compósitos com fibra *in natura* e modificada, a fim de demonstrar o comportamento mecânico dos mesmos. Através das curvas observa-se que conforme aumenta o teor de fibras na matriz de PEBD ocorre uma redução da deformação dos compósitos, reduzindo assim a resistência mecânica.

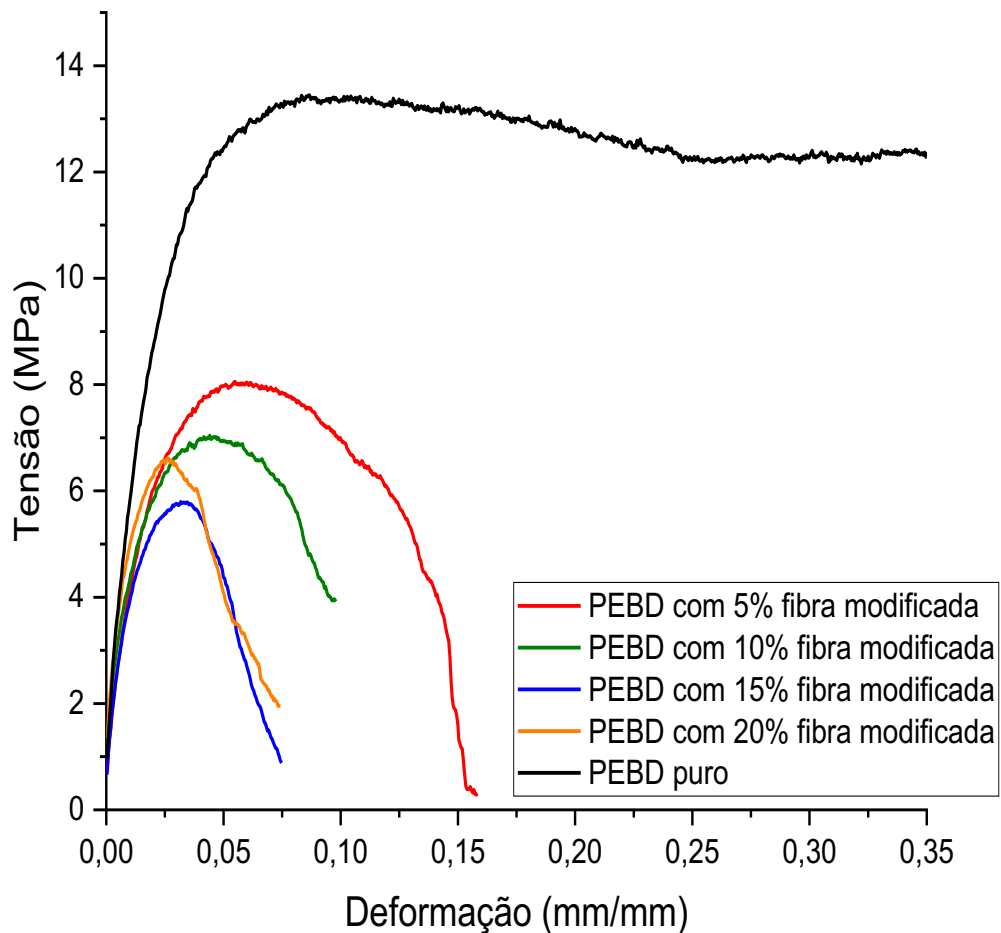
Figura 28 - Curva tensão x deformação do compósito PEBD puro e o compósito com 5/10/15 e 20% (m/m) de fibra de cana-de-açúcar *in natura*



Fonte: Autoria própria.

Nota-se também uma discrepância do resultado do PEBD puro com relação aos compósitos reforçados com fibras, onde os mesmos apresentaram propriedades mecânicas inferiores ao PEBD puro, conforme Figura 29. Nota-se uma região plástica mais extensa do PEBD puro quando comparado aos compósitos, indicando problemas de adesão interfacial fibra/matriz. Como os corpos de prova foram feitos em forma de placas, tem-se uma matriz polimérica e uma dispersão de fibras nessa matriz, dispostas com uma compactação reduzida. Assim, com a adição de fibras aumentou-se a quantidade de pontos de concentradores de tensão no sistema, reduzindo a resistência mecânica e deformação do material.

Figura 29 - Curva tensão x deformação do compósito PEBD puro e o compósito com 5/10/15 e 20% (m/m) de fibra de cana-de-açúcar modificada



Fonte: Autoria própria.

Ainda analisando a Figura 29, observa-se que com a adição de 5% de fibra modificada no compósito, houve uma queda na tensão e na deformação plástica quando comparado com o PEBD puro. Mas ao adicionar 20% de fibra modificada, o compósito é mais rígido e mais resistente que o compósito com 15% de fibra modificada. Porém, quando comparado com a curva do PEBD puro nota-se que o alongamento diminui drasticamente indicando que o compósito é mais rígido que o PEBD puro.

No entanto, verifica-se que tanto os compósitos com 5% de fibra *in natura* quanto os com 5% de fibra modificada apresentaram os melhores resultados mecânicos dentre os compósitos analisados, logo, pode-se concluir que o aumento

do teor da fibra proporcionou surgimento de vazios prejudicando o desempenho mecânico dos materiais. Além disso, a baixa compatibilidade da matriz com a fibra devido à natureza polar da superfície das fibras em meio a uma matriz apolar, pode ter gerado baixa adesão interfacial fibra-matriz.

Ademais, nota-se que todos os corpos de prova ensaiados sofreram deformação plástica permanente, no qual se observou o início da estrição, reduzindo a seção transversal e ocorrendo a distribuição das tensões ao longo do corpo de prova. A medida que a estrição foi aumentando ocorreu a orientação molecular das cadeias, que torna o material mais resistente à deformação. Por fim, observa-se o alongamento constante no corpo de prova na sua parte útil até o rompimento, caracterizando a tensão de ruptura.

## 7 CONCLUSÃO

Conclui-se que apesar da diferença significativa entre as curvas do PEBD puro com as dos materiais compósitos, o objetivo em obter os compósitos de polietileno de baixa densidade reforçados com a fibra do bagaço da cana-de-açúcar *in natura* e modificada e caracterizá-los mecanicamente foi alcançado. Os corpos de prova apresentaram características regulares, com uma boa dispersão das fibras na matriz polimérica, isso devido a um processo de moagem e moldagem por compressão eficiente.

Por meio da caracterização mecânica via ensaio de tração foi possível identificar a gradativa perda de resistência mecânica com o aumento do teor de fibras na matriz polimérica de PEBD. Observa-se uma redução na tensão máxima, diminuição na resistência mecânica e conseqüentemente um aumento da fragilidade do material. Verificou-se que os compósitos com 5% de fibra *in natura* e os com 5% de fibra modificada apresentaram os melhores resultados mecânicos quando comparado com os demais compósitos (10%, 15% e 20%).

Os corpos de prova fabricados e ensaiados não apresentaram propriedades mecânicas superiores ao PEBD puro, pois ocorreu a falta de uma melhor mistura entre PEBD e a fibra, já que os mesmos foram misturados de forma manual.

Os compósitos foram feitos via moldagem por compressão (em placas metálicas), produzindo um material não muito compacto e com alguns pontos de vazios, gerando assim concentradores de tensão dentro do sistema. Estes, por sua vez, foram aumentados dentro do sistema à medida que a quantidade de fibra também era aumentada, prejudicando no desempenho mecânico dos materiais.

Assim, a utilização do bagaço de cana-de-açúcar como reforço em uma matriz de PEBD é uma alternativa para o reaproveitamento desse material, de forma ecologicamente correta e de menor impacto ambiental, evitando dessa maneira a emissão de gases poluentes na atmosfera através da sua queima na indústria sucroalcooleira.

## 8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos nesse trabalho, podemos citar algumas sugestões para dar continuidade no estudo do compósito de PEBD com reforço de fibra natural, como:

- Avaliar a inserção de compatibilizantes ou tratamento alcalino na fibra que melhore as propriedades mecânicas do compósito, como resistência mecânica e a rigidez.
- Realizar o desenvolvimento do compósito de PEBD com a fibra de cana-de-açúcar através da extrusão, a fim de obter um material mais homogêneo e em seguida fazer as placas de compósito por meio da moldagem por injeção para obter placas mais compactas e mais irregulares, diminuindo o aparecimento de concentradores de tensão.
- Caracterizar o compósito de PEBD reforçado com fibra natural utilizando o ensaio de impacto, a fim de avaliar a fratura do material a partir da sua capacidade de absorver a energia que a ele foi empregada.
- Caracterizar o compósito através da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para analisar a morfologia das fibras e a adesão interfacial das fibras à matriz.
- Caracterizar termicamente os compósitos de PEBD reforçado com fibra natural a partir de análises de TGA e DSC a fim de analisar a estabilidade térmica desses compósitos. Em que através da técnica de TGA determina-se a temperatura de degradação do material e na DSC observa-se as temperaturas de transição vítrea e de fusão do material.



## REFERÊNCIAS

ALBINANTE, S. R.; PACHECO, E. B. A. V.; VISCONTE, L. L. Y. Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas. **Química Nova**, v. 36, n. 1, p.114-122, 2013.

BARBOSA, L. A., et al. **Polietileno de baixa densidade - PEBD: mercado, produção, principais propriedades e aplicações**. Espacios, v. 38, n. 17, p. 10-23, 2016.

BRASKEM. **Polietileno de Baixa Densidade BC818**. Disponível em: <<https://www.braskem.com.br/produtos>>. Acesso em 22 abril 2021.

CALLISTER Jr., W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2008.

ESMERALDO, M. A. **Preparação de novos compósitos suportados em matriz de fibra vegetal/natural**. 2006. 99 f. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

FARIAS, J. G. G. **Modificação superficial de fibras de coco por tratamento a plasma para utilização como fase de reforço em amido termoplástico**. 2012. 86 f. Projeto de graduação em engenharia de materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

FONSECA, A. S. **Caracterização tecnológica das fibras do estipe de *Desmoncus polyacanthos* Mart.** 2012. 116 f. Dissertação (Mestrado em ciência e tecnologia da madeira). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GOMES, M. A. **Propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de folhas de abacaxizeiro (PALF)**. 2015. 139 f. Tese (Doutor em engenharia e ciência dos materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2015.

NETO, F. L.; PARDINI, L.C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. 1 ed., São Paulo: Blucher, 2006.

LINO, A. G. **Composição química e estrutural da lignina e lipídios do bagaço e palha da cana-de-açúcar**. 2015. 97 f. Tese (Doutor em ciência). Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2015.

MENDES, L. M.; SILVEIRA, A. M. **Ensaio mecânicos**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.

MESQUITA, F. A. **Modificação das propriedades do polietileno de alta densidade por diferentes condições de extrusão**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em engenharia metalúrgica e de materiais). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MILANI, C. **Influência da incorporação de resíduos de policarbonato em compósitos fibra de vidro/poliéster**. 2015. 45 f. Trabalho de diplomação em engenharia de materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MÜLLER, R. L., MÜHLMANN, C. M., RODRIGUEZ, A. L., *et al.* **Compósito de polietileno de baixa densidade e fibra de bagaço de cana-de-açúcar**. Anais 9º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2007.

OLIVEIRA, E. F. B.; BARROS, S. S. U. Resíduos e aspectos sustentáveis da cana-de-açúcar. **Revista Eletrônica da Faculdade de Ciências Exatas e Agrárias**, v. 7, n. 10, p. 28-45, 2017.

OLIVEIRA, M. P. **Propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos poliméricos reforçados por fibras de bucha**. 2013. 95 f. Dissertação (Mestrado em ciência dos materiais). Instituto Militar de Engenharia, rio de Janeiro, 2013.

OLIVEIRA, O. C. **Avaliação de fibras de bagaço de cana-de-açúcar *in natura* e modificada para aplicação em compósitos**. 2018. 115 f. Dissertação (Mestrado em engenharia e ciência dos materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2018.

PACHECO, L. J. **Efeito da temperatura e da taxa de deformação no comportamento mecânico do PEAD reciclado**. 2014. 111 f. Tese (Doutor em ciências em engenharia mecânica). Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2014.

PAULA, P. G. **Formulação e caracterização de compósitos com fibras vegetais e matriz termoplástica**. 2011. 87 f. Dissertação (Mestrado em engenharia e ciência dos materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.

QUINELATO, C. **Métodos de extração da lignina do bagaço da cana-de-açúcar da região noroeste do estado de São Paulo**. 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado em química). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2016.

RIBEIRO, G. L. **Compósitos de rejeitos de polietileno de baixa densidade reforçados com bagaço de cana-de-açúcar *in natura* e tratado a explosão a vapor**. 2014. 45 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

SANTOS, H. F. Análise conformacional de modelos de lignina. **Química Nova**, v. 24, n. 4, p. 480-490, 2001.

SARMIENTO, C. R. **Bagaço de cana-de-açúcar e sua utilização como material de construção**. 1996. 105 f. Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

SCHMIDT, T. M. **Investigação de fibras vegetais como promotores de fluxo na moldagem por transferência de resina.** 2016. 106 f. Tese (Doutor em engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

TUTA, N. F. **Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar no ciclo da cana-planta com aplicação de efluente de esgoto tratado via gotejamento subsuperficial.** 2013. 107 f. Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

WEBER, A M. **Viabilidade técnica da utilização de fibra de curauá (*ananás erectifolius*) como reforço em compósitos cimentícios laminados.** 2018. 115 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.