



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**REBECA NERY MARQUES**

**DESENVOLVIMENTO DE BIOCOPÓSITO UTILIZANDO RESÍDUOS DO  
PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE LONA PARA PNEUS E BAGAÇO DE  
CANA-DE-AÇÚCAR**

**SALVADOR  
2024**

**REBECA NERY MARQUES**

**DESENVOLVIMENTO DE BIOCOPÓSITO UTILIZANDO RESÍDUOS DO  
PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE LONA PARA PNEUS E BAGAÇO DE  
CANA-DE-AÇÚCAR**

Trabalho de conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, apresentado como Monografia como requisito para obtenção do título de Engenheiro Químico.

Orientadores: Prof. Dr. Luiz Antônio Magalhães Pontes  
Profa. Dra. Leila Maria Campos Aguilera

**SALVADOR  
2024**



# UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA ESCOLA POLITÉCNICA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Rua Aristides Novis, nº 02–Federação–Tel: 3283-9874 –  
CEP 40.210.630–Salvador - BA e-mail: engquim@ufba.br



## FICHA DE AVALIAÇÃO DO TCC

**Aluno (a):** Rebeca Nery Marques

**Matrícula:** 218217161

**Título:** Desenvolvimento de biocompósito utilizando resíduos do processo de fabricação de lona para pneus e bagaço de cana-de-açúcar

**Orientador:** Luiz Antônio Magalhães Pontes – (DEQ/UFBA)

**Coorientadora:** Leila Maria Aguilera Campos – (PPEQ/UFBA/UNIFACS)

**Avaliador 1:** Humberto Polli - (IQ/UFBA)

**Avaliador 4:** Esther Fernandes Maltez Farias - Engenheira Química

De acordo com o julgamento dos avaliadores, o Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química de Rebeca Nery Marques foi aprovado com Nota 10.

### APROVADO COM NOTA 10 (dez)

.....  
Salvador, 10 de dezembro de 2024

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** LUIZ ANTONIO MAGALHAES PONTES  
Data: 10/12/2024 14:30:12-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** LEILA MARIA AGUILERA CAMPOS  
Data: 10/12/2024 15:53:36-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Luiz Antônio Magalhães Pontes**  
Orientador

**Leila Maria Aguilera Campos**  
Coorientadora

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** HUMBERTO POLLI  
Data: 10/12/2024 15:01:33-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ESTHER FERNANDES MALTEZ FARIA  
Data: 10/12/2024 16:03:13-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Humberto Polli**  
Professor IQ/UFBA

**Esther Fernandes Maltez Farias**  
Engenheira Química

Este Trabalho de Graduação foi julgado adequado para a obtenção do grau de Engenheiro Químico e aprovado em sua forma final pela Comissão examinadora e pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Química, Escola Politécnica, da Universidade Federal da Bahia.

Salvador, 13 de dezembro de 2024

---

Luiz Antônio Magalhães Pontes (PPEQ/UFBA)  
Orientador

---

Leila Maria Aguilera Campos (PPEQ/UFBA/UNIFACS)  
Coorientadora

---

Esther Farias (PPEQ/UFBA)  
Engenheira Química convidada e Mestranda

---

Humberto Polli (IQ / UFBA)  
Professor Depto. de Físico-Química  
Professor convidado

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu pai, pelo esforço incansável em garantir minha felicidade e sucesso. À Marcella, que, mesmo à distância, me inspira a ser uma pessoa melhor. Expresso também minha profunda gratidão aos meus orientadores, Luiz Antônio Magalhães Pontes e Leila Maria Campos Aguilera, pela paciência e suporte incondicional ao longo de todos os meus anos de faculdade.

Aos colegas de laboratório do Núcleo de Química Verde, pelo apoio e suporte essenciais para que eu chegasse até aqui, e em especial à Esther Farias, por transformar minhas ideias artísticas em realidade. Agradeço ao professor Humberto Polli e sua equipe pela disponibilidade, orientação e auxílio nas análises realizadas em seu laboratório.

À KordSA, por me inspirar e apoiar na realização deste trabalho, ao time de Qualidade: Andreza Piedade, Natalice Silva, Janaína Coutinho, Marcos Alex Matias, Delson Santos, Ivanildo Torres, Renilson Santos, Carlos Silva, Aparecido Santos, Geovana Cruz, Layla Souza, e Luciana Martins e ao meu time de Tecnologia — Raissa Viana, NG Gainlam, Jackson Pinheiro e Erhan KOP — por todo o apoio e confiança em mim depositados.

## RESUMO

Neste trabalho foram desenvolvidos e caracterizados biocompósitos formados a partir de resíduos de PET e bagaço de cana-de-açúcar, utilizando glicerol ou óleo de mamona como plastificante através da moldagem por compressão. Foram realizados testes de resistência à tração no ponto de ruptura utilizando um dinamômetro para determinar esta característica nos compósitos formados. As análises mostraram que a adição de plastificante e a variação na proporção de bagaço de cana-de-açúcar proporcionaram diferentes níveis de resistência mecânica, com determinadas composições apresentando resistência à tração no ponto de ruptura adequada para possíveis aplicações. O melhor compósito desenvolvido continha a composição de 10% da bagaço de cana-de-açúcar utilizando a matriz de resíduo em pó fino de PET e 2,5% de bagaço de cana-de-açúcar com o resíduo de fio seco de PET. Os resultados indicam que os compósitos desenvolvidos têm potencial para substituição de materiais convencionais em diversas aplicações, como reforços e painéis internos, e peças decorativas, contribuindo para o aproveitamento sustentável de resíduos industriais e promovendo a economia circular.

**Palavras-Chaves:** Biocompósitos; Bagaço de cana-de-açúcar; PET

## ABSTRACT

In this study, biocomposites were developed and characterized using PET waste and sugarcane bagasse, employing glycerol or castor oil as plasticizers through compression molding. Tensile strength tests at the breaking point were conducted using a dynamometer to evaluate the mechanical properties of the formed composites. The analysis revealed that the addition of plasticizers and the variation in sugarcane bagasse content resulted in different levels of mechanical resistance, with certain compositions showing tensile strength at breaking point suitable for potential applications. The best performing composite consisted of 10% sugarcane bagasse combined with a fine powder PET waste as matrix and 2.5% sugarcane bagasse with dry PET yarn waste as matrix. The results indicate that these biocomposites have potential for replacing conventional materials in various applications, such as reinforcements and internal panels, and decorative pieces, contributing to sustainable waste management and promoting a circular economy.

**Keywords:** Biocomposites; Sugarcane bagasse; PET

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cadeia de repetição do PET .....	19
Figura 2 - Principal conteúdo do bagaço de cana-de-açúcar: em azul, a celulose é responsável pela construção da célula vegetal, o esqueleto. ....	20
Figura 3 - Estrutura do glicerol .....	26
Figura 4 - Estrutura do ácido ricinoleico que é o principal componente do óleo de.....	27
mamona .....	27
Figura 5 - Molde utilizado para formação dos compósitos à esquerda e o mesmo.....	36
molde dentro da prensa utilizada. ....	36
Figura 6 - Fio cru (esquerda) e resíduo em pó fino do grão de PET (direita). ....	38
Figura 7 - Análise Termogravimétrica do fio cru de PET (esquerda) e do pó.....	40
residual de grão de PET (direita).....	40
Figura 8 - Análise Termogravimétrica do fio cru e pó residual de PET .....	41
sobrepostas.....	41
Figura 9 - Análise Termogravimétrica do bagaço de cana-de-açúcar .....	42
Figura 10 – Curva de TG do Glicerol.....	43
Figura 11 – Curva de TG do óleo de mamona .....	44
Figura 12 - FTIR do bagaço de cana-de-açúcar.....	45
Figura 13 - FTIR do pó residual do grão de PET.....	46
Figura 14 – FTIR do glicerol .....	47
Figura 15 – Espectro do óleo de mamona. ....	48
Figura 16 - DSC do bagaço de cana-de-açúcar .....	49
Figura 17 - DSC do fio cru de PET .....	50
Figura 18 - DSC do resíduo em pó do grão de PET. Fonte: Própria Autora (2024). ....	50
Figura 19 - Gráficos demonstrando a tendência da resistência à tração no ponto de ruptura dos compósitos .....	53
formados com glicerol (a esquerda) e óleo de mamona (a direita), resíduo do .....	53
grão de PET e reforçados com bagaço de cana-de-açúcar .....	53
Figura 20 - Boxplot para resistência à tração no ponto de ruptura e espessura dos compósitos formados pelo.....	55
pó residual do grão de PET .....	55

Figura 21 - Curva da resistência à tração no ponto de ruptura dos compósitos formados pelo pó residual do grão de PET.....	55
Figura 22 - Compósitos de pó residual de grão de PET, óleo de mamona e bagaço.....	56
Figura 23 - Compósitos de pó residual de grão de polietileno com glicerol e bagaço....	58
Figura 24 - Gráficos da resistência à tração dos compósitos de fio cru. ....	59
Figura 25 - Filamentos do fio cru de PET intactos internamente após teste no dinamômetro. ....	62
Figura 26 - Compósitos formados com fio cru, bagaço de cana-de-açúcar e glicerol....	63
Figura 27 - Compósitos formados com fio cru, bagaço de cana-de-açúcar, glicerol ou óleo de mamona.....	64
Figura 28 – Compósitos formados com fio cru, bagaço de cana-de-açúcar e óleo de mamona. ....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades médias da fibras de PET utilizada na fabricação da lona de reforço interno de pneus no Brasil.....	17
Tabela 2 - Propriedades físicas do glicerol .....	25
Tabela 3 - Propriedades físicas do óleo de mamona .....	27
Tabela 4 – Biocompósitos na literatura. ....	30
Tabela 5 – Propriedades dos compósitos reforçados com bagaço de cana-de-açúcar. ....	31
Tabela 6 – Condições de teste.....	35
Tabela 7 - Identificação das amostras.....	36
Tabela 8 - Massas dos componentes utilizados por compósito .....	39
Tabela 9 - Espessura e resistência à tração ruptura dos compósitos formados usando pó residual.....	52
de grão. ....	52
Tabela 10 - Espessura dos compósitos formados com pó residual do grão de PET .....	54
Tabela 11 - Resultados de resistência à tração no ponto de ruptura e espessura para os compósitos formados .....	60
com fio cru e glicerol. ....	60
Tabela 12 - Resultados de resistência à tração no ponto de ruptura e espessura para os compósitos formados com fio cru e óleo de mamona. ....	61
Tabela 13 - Melhores combinações de biocompósitos.....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PET	Polietileno Tereftalato
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PVC	Policloroeteno / Policloreto de vinil
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier
TG	Análise Termogravimétrica
ASTM	American Society for Testing and Materials
Mpa	Megapascal
cP	Centipoise
°C	Graus Celsius
g/cm <sup>3</sup>	Gramas por centímetro cúbico
Kgf/cm <sup>2</sup>	Quilograma-força por centímetro quadrado
L/min	Litros por minuto
mg KOH/g	Miligramma de Hidróxido de Potássio por grama
min	Minuto
%	Porcentagem
dtex	Decitex

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS GERAIS .....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	RESÍDUOS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE LONA PARA REFORÇO INTERNO DE PNEUS	
	17	
2.2	BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR .....	19
2.3	PLASTIFICANTES .....	24
<b>2.3.1</b>	<b>Glicerol .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Óleo de Mamona .....</b>	<b>27</b>
2.4	MOLDAGEM POR COMPRESSÃO .....	29
2.5	BIOCOMPÓSITOS .....	30
<b>3</b>	<b>MATERIAIS.....</b>	<b>33</b>
3.1	MATERIAIS POLIMÉRICOS .....	33
3.2	BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR .....	33
3.3	PLASTIFICANTES .....	33
<b>4</b>	<b>MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
4.1	SECAGEM DAS MATÉRIAS PRIMAS .....	34
4.2	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG) .....	34
4.3	ESPECTROSCOPIA DE INFRAREMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)34	
4.4	CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC).....	34
4.5	MOLDAGEM POR COMPRESSÃO.....	35
4.6	ENSAIOS MECÂNICOS .....	37
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>38</b>
5.1	ANÁLISES DAS MATÉRIAS PRIMAS.....	38
5.1.1	<b>Análise termogravimétrica (TG) .....</b>	<b>40</b>
5.1.2	<b>Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)44</b>	
5.1.3	<b>Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....</b>	<b>49</b>
5.2	ASPECTO FÍSICO DOS COMPÓSITOS .....	51

5.2.1	<b>Compósito com pó residual .....</b>	52
5.2.2	<b>Compósitos com fio cru.....</b>	59
5.3	<b>APLICAÇÕES .....</b>	65
6	<b>CONCLUSÃO.....</b>	67
7	<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	68
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	69

## 1 INTRODUÇÃO

O plástico trouxe conforto e praticidade para toda a sociedade moderna. Ele é amplamente utilizado em setores como embalagens, construção civil, automotivo e eletrônico devido à sua versatilidade, durabilidade e custo relativamente baixo. No setor de embalagens, protege alimentos e produtos contra contaminação, prolongando sua vida útil. Na construção civil, é empregado em tubulações e reforços devido à resistência à corrosão. Além disso, plásticos como o PET são usados na indústria automotiva para componentes internos e externos e, no setor eletrônico, para carcaças e isolantes (Joseph *et al.*, 2024; Andreasi *et al.*, 2021). Historicamente, é o material mais produzido pelo homem, com cerca de 8,300 Mt entre 1950 e 2015 (Geyer *et al.*, 2017).

Suas propriedades únicas, como dureza, durabilidade e baixa necessidade de manutenção, facilitam sua aplicação na indústria, comércio e agricultura (Ali *et al.*, 2021). Porém, as mesmas características que o tornam um material tão versátil são responsáveis pela dificuldade de sua degradação e pela contaminação do planeta, tornando-o um dos maiores símbolos do impacto negativo da humanidade na natureza (Zeenat *et al.*, 2021).

A degradação dos materiais poliméricos pode levar de centenas a milhares de anos, dependendo das condições do ambiente (Zhang *et al.*, 2021). De acordo com Chamas *et al.* (2020), sacolas plásticas feitas de polietileno de baixa densidade (PEBD) degradam-se em 5 anos, enquanto garrafas feitas de polietileno de alta densidade (PEAD) podem levar 250 anos. Já materiais industriais de alta densidade e resistência estrutural podem demorar milhares de anos para se decomporem, independentemente das condições.

Resíduos plásticos já foram encontrados no gelo do Ártico e em águas profundas do oceano, compondo cerca de 70% dos resíduos nas praias (Iwanicki; Zamboni, 2020). No oceano, estima-se que existam 5,25 trilhões de partículas de plástico (Moorthy *et al.*, 2020), que danificam habitats marinhos e prejudicam a saúde humana. As previsões de 2016 sobre a emissão de plástico no meio marinho e terrestre indicavam uma duplicação até 2025 (MacLeod *et al.*, 2021). Além disso, os custos para mitigar os danos causados por essa poluição são altos, resultando em prejuízos financeiros consideráveis.

Segundo Kaza *et al.* (2018), a taxa de reciclagem de plástico no Brasil é de apenas 1%, uma das menores do mundo, que possui uma média de 9%. Isso é alarmante, pois o Brasil é o quarto maior produtor mundial de plásticos. Portanto, a gestão adequada desses

resíduos possui importância fundamental na mitigação dos impactos negativos causados pela poluição, tanto no meio ambiente quanto na saúde humana.

Em 2022, a produção diária de resíduos plásticos correspondia a 224 mil toneladas, e 39% desses resíduos não possuem destinação adequada, descumprindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Os demais resíduos coletados por serviços públicos ou privados foram descartados em aterros sanitários (Silva; Von Adameck, 2024). Porém, mesmo descartados corretamente, esses itens podem demorar centenas de anos para se decompor (Zhang *et al.*, 2021), e a tendência da produção de plástico é apenas aumentar. Geyer *et al.* (2017) estimam que, mantido o ritmo atual de produção e reciclagem de plásticos, até 2050, 12 bilhões de toneladas métricas de plásticos serão descartadas, enquanto apenas 9 bilhões serão recicladas.

Isso significa que a poluição ambiental continuará aumentando, a menos que sejam desenvolvidas alternativas viáveis para a reutilização dos plásticos existentes, reduzindo a necessidade de uma nova produção.

Segundo Merrington (2024), é possível dividir os plásticos a serem reciclados em pré-consumidor e pós-consumidor. Os materiais classificados como pré-consumidor estão em foco para a reciclagem, já que são mais novos, relativamente limpos e mais consistentes quimicamente quando comparados aos plásticos usados (pós-consumidor). Mesmo a reciclagem do plástico pré-consumidor apresenta desafios, pois pode ser necessário usar aditivos para compensar a perda de características mecânicas dos usos anteriores. Além disso, ao misturar plásticos de diferentes polímeros, ocorre um enfraquecimento da força de adesão interfacial entre eles, o que pode dificultar a fabricação de novos materiais (Merrington, 2024).

Uma opção para o reaproveitamento dos plásticos é sua utilização em biocompósitos, que surgem da combinação de resíduos poliméricos (como os plásticos) com materiais biodegradáveis (como fibras naturais). Essa combinação tem o intuito de reforçar as propriedades mecânicas desses materiais através de componentes sustentáveis (Ilyas; Sapuan, 2020). As fibras naturais apresentam a vantagem de serem abundantes, biodegradáveis e não tóxicas. Além disso, o uso desses resíduos de biomassa contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, evitando sua incineração, que é o principal destino atual. Dessa forma, considerar as fibras naturais como uma alternativa para o reforço

de um material polimérico é um passo lógico para um produto mais sustentável (Ramachandran *et al.*, 2022).

O Brasil é o principal produtor mundial de cana-de-açúcar, com 758 milhões de toneladas produzidas em 2019 (Alokika *et al.*, 2021). Após o processamento industrial da cana-de-açúcar, seja pelo setor sucroalcooleiro ou de biocombustíveis, um dos resíduos gerados é o bagaço de cana-de-açúcar. Esse resíduo é composto por aproximadamente 32-45% de celulose, 20-32% de hemicelulose e 17-32% de lignina (Alokika *et al.*, 2021). O uso da fibra do bagaço de cana na fabricação de compósitos oferece uma relação custo-benefício altamente vantajosa, uma vez que a utilização de resíduos agroindustriais sustentáveis e de baixo custo resulta em um biocompósito mais acessível e de alto valor agregado.

A celulose é o componente de maior interesse em uma fibra, pois apresenta um módulo de elasticidade que se compara aos enchimentos sintéticos comumente utilizados para reforçar compósitos e age como um esqueleto na célula vegetal, melhorando sua rigidez, resistência térmica e estabilidade dimensional. Dessa forma, ela também pode contribuir significativamente para as propriedades dos compósitos. Por outro lado, a hemicelulose, devido à sua natureza amorfa, impacta negativamente as propriedades mecânicas do compósito, pois não fornece estabilidade dimensional (Mokhena *et al.*, 2018; Mu *et al.*, 2017). A celulose do bagaço de cana-de-açúcar pode ser isolada por meio de pré-tratamentos químicos que alteram a estrutura da fibra e removem os componentes que atuam como barreiras para seu acesso, como o tratamento alcalino com hidróxido de sódio (NaOH), que remove componentes amorfos (hemicelulose e lignina) e expõe as regiões cristalinas da celulose (Mahmud *et al.*, 2021). O pré-tratamento realizado na fibra deve ser cuidadoso para evitar uma degradação excessiva e a consequente remoção da celulose, visto que a extração inadequada pode impactar negativamente na eficácia da adesão entre a fibra e a matriz polimérica sintética (Ribeiro *et al.*, 2017).

Resíduos pré-consumidor, como aqueles provenientes do processo de fabricação de lonas de reforço para pneus, apresentam-se como fios finos resultantes do processo de extrusão do polímero de PET e podem ser relevantes para a produção de biocompósitos. Esses materiais se tornam descartáveis devido à não conformidade com especificações estabelecidas para cada produto. É importante observar que estes materiais são termoplásticos amplamente utilizados, apresentam uma taxa de degradação ambiental lenta

e derivam de fontes não renováveis, tornando-os excelentes candidatos para serem reciclados (Castelvetro *et al.*, 2021). O uso de PET, proveniente de resíduos da indústria têxtil, assegura uma maior garantia de sucesso, pois os materiais utilizados mantêm as mesmas propriedades e evitam contaminações, encontradas em resíduos provindos de PET pós-consumidor (Merrington, 2024).

No setor da indústria têxtil de materiais de reforço, a conscientização acerca da sustentabilidade está crescendo, dado o potencial impacto negativo que esses produtos podem causar ao meio ambiente. Além disso, como em outros setores industriais, há um elevado consumo de energia, água e produtos químicos. Portanto, a identificação de alternativas viáveis para o gerenciamento desses resíduos contribuirá significativamente para as metas corporativas e para a tendência global de adoção de práticas mais sustentáveis (Senthil Kumar; Suganya, 2017).

Os materiais ditos fora de especificação na indústria têxtil, denominados de refugo, são vendidos por um preço simbólico e muitas vezes até recolhidos apenas para descarte adequado. A parcela deste material que não é aproveitada necessita de alternativas para garantir um destino sustentável. Nesse contexto, biocompósitos formados a partir da integração do refugo com resíduos da agroindústria se apresentam como uma alternativa sustentável interessante para reutilizar às 3,44 milhões de toneladas métricas de resíduo plástico produzidas por ano (Alencar *et al.*, 2023).

A principal dificuldade para incorporar uma fibra natural em um polímero como o PET é a incompatibilidade entre a natureza hidrofílica da fibra e a matriz polimérica, que é hidrofóbica. O uso de plastificantes é essencial para melhorar a processabilidade do compósito e suas propriedades mecânicas (Santos *et al.*, 2014). A atuação de um plastificante ocorre a partir das interações com as cadeias poliméricas: ele é capaz de afastar e se inserir entre as moléculas da matriz, o que confere mobilidade às cadeias, diminuindo a rigidez do compósito. Simultaneamente, a parte polar do plastificante é capaz de interagir com os grupos funcionais presentes nas fibras de reforço, o que favorece uma melhor dispersão destas, pois agora elas estão inseridas na matriz com o auxílio do plastificante. Essa combinação de efeitos resulta em materiais mais uniformes e com propriedades mecânicas aprimoradas (Goodwin, 2024).

Tradicionalmente, os ftalatos, como o DEHP (di-2-etylhexil ftalato) e o DINP (diisononil ftalato), são amplamente utilizados devido à sua eficácia, baixo custo e compatibilidade com diversos plásticos, especialmente o PVC. Porém, essas substâncias causam impacto na saúde humana e na sustentabilidade. Estudo sobre os ftalatos mostram que são capazes de desenvolver problemas de saúde em animais expostos a eles, em altas doses desenvolveram tumores em ratos e os de baixa massa molar causaram infertilidade. Devido a sua natureza tóxica, muitos plastificantes já foram banidos na fabricação de brinquedos para crianças de até 12 anos (Goodwin, 2024). Nesse contexto, a busca por alternativas sustentáveis e não tóxicas é fundamental para minimizar os impactos ambientais e à saúde associados a esse processo.

## 1.1 Objetivos Gerais

Desenvolver biocompósitos através de moldagem por compressão térmica em diferentes condições a fim de otimizar a interação entre os componentes, utilizando como matérias primas o bagaço de cana-de-açúcar e resíduos do processo de produção de Ionas para reforço interno de pneus, além de glicerol e óleo de mamona como plastificantes.

## 1.2 Objetivos Específicos

- Analisar as propriedades térmicas e grupos funcionais dos resíduos poliméricos e da biomassa visando compreender como essas características influenciam o comportamento dos compósitos durante o processamento e no desempenho final dos materiais.
- Preparar o bagaço de cana-de-açúcar para ser utilizado como reforço, visando ajustar a granulometria do bagaço por meio de Trituração e Peneiramento para aumentar a área superficial e garantir uma melhor interação entre os componentes durante a moldagem.
- Avaliar a composição das misturas e comparar as propriedades mecânicas, dos compósitos formados.
- Avaliar a correlação entre a proporção de plastificante, reforço e polímero para identificar a composição que apresenta melhor desempenho mecânico e estrutural.
- Realizar testes de resistência de ruptura no dinamômetro para avaliar a resistência mecânica dos compósitos formados, a fim de verificar sua adequação e desempenho em possíveis aplicações.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Resíduos do processo de produção de lona para reforço interno de pneus

O tecido utilizado para o reforço interno de pneus é o que garante força e estabilidade dimensional ao pneu. As fibras poliméricas mais comumente utilizadas para a fabricação deste tecido são poliéster e poliamidas (de nome comercial Nylon), que possuem espessura entre 700-3300 *dtex* – medida utilizada na indústria têxtil para expressar a espessura do fio, indicando a massa em gramas de 10.000 metros de fio.

Este tecido é incorporado à borracha durante o processo de fabricação do pneu, chamado de calandragem. Esse tecido pode ser personalizado conforme a necessidade de cada tipo de pneu, mas todos devem suportar a pressão nos pneus, fornecer estabilidade dimensional enquanto o pneu está em uso e absorver o choque na carcaça e na correia. Para atingir esses objetivos, as propriedades do tecido devem ser: alta resistência à ruptura, alta resistência à fadiga, alto módulo, alto nível de adesão fio-borracha, baixo encolhimento, estabilidade dimensional e retenção das características em altas temperaturas.

Tabela 1 – Propriedades médias da fibras de PET utilizada na fabricação da lona de reforço interno de pneus no Brasil.

Propriedade Física	PET
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1380
Umidade (%)	0,5
Ponto de Fusão (°C)	260
Temperatura de Transição Vítreia (°C)	69

Fonte: Própria Autora (2024)

O processo de fabricação de lonas para reforço interno de pneus é composto por quatro etapas: fiação, retorcimento, tecelagem e dipping. Os resíduos gerados são provenientes apenas do primeiro processo, que será aprofundado adiante.

A primeira etapa do processo é retirar a umidade dos grãos poliméricos com o uso de um secador capaz de comportar 7 toneladas. O equipamento opera a 170 °C e permanece em operação por 8 horas até que a umidade seja reduzida a 50 ppm. Ele é encamisado com nitrogênio para impedir que a umidade externa alcance a matéria-prima. Durante esse

processo, os grãos podem ser fragmentados devido ao impacto da rotação, gerando um resíduo com uma granulometria maior e inadequada para a próxima etapa.

A etapa seguinte consiste no bombeamento do polímero através da extrusora, que possui 6 zonas de aquecimento atuando próximas a 300 °C para atingir a viscosidade necessária. O material atinge o estado viscoelástico ideal para ser moldado e, em seguida, passa pelos capilares da fieira. O polímero flui através dos orifícios da fieira pela gravidade do seu próprio peso, formando a quantidade de filamentos determinada pela especificação do processo, que é denominada de fio seco.

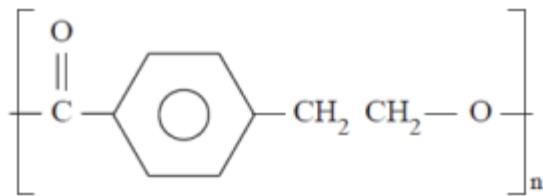
No processo de *quenching*, é soprado ar frio sobre os filamentos para resfriá-los a uma taxa específica, fundamental para garantir a resistência à tração no ponto de ruptura do produto final. Essa característica também pode ser chamada de força de ruptura no contexto da indústria têxtil. Os filamentos são então unidos para formar um único fio, ao qual é aplicado um óleo de encimagem, cuja finalidade inclui a redução do atrito dos fios nos cilindros de estiragem. Esses cilindros, com diferentes tensões e temperaturas, promovem o estiramento e encolhimento do produto final desta etapa, denominado de fio estirado.

Esse processo pode gerar refugo quando há quebra dos fios, entupimento das fieiras ou alguma variação no processo que resulta em materiais que não atendem às especificações estabelecidas. Isso pode ocorrer antes ou depois da aplicação do óleo de encimagem. Antes da aplicação, o material é denominado de fio cru e, depois, de fio estirado. A maior parte desse refugo é vendida para empresas que utilizam o fio sem a necessidade de transformá-lo em outro material ou formato.

Ao sair da extrusora, as cadeias moleculares do polímero ainda estão orientadas de forma aleatória. À medida que o processo de estiramento avança, elas se alinham gradualmente na direção do estiramento e, em seguida, são resfriadas a uma velocidade controlada que permita uma cristalização adequada. Em velocidades de resfriamento muito altas, o PET pode permanecer predominantemente em um estado amorfo, o que resulta em filamentos mais frágeis. O processo ideal de estiragem deve garantir um grau de cristalinidade equilibrado, proporcionando melhor resistência mecânica.

Os fios de polietileno tereftalato (PET) possuem baixo custo e facilidade de processamento, o que oferece uma vantagem ao poliéster sobre outras fibras, como as poliamidas.

Figura 1 - Cadeia de repetição do PET.



Fonte: SINGH; BEDI; KAITH (2021)

Uma lona produzida com PET é comumente aplicada a veículos de passeio, veículos leves, ônibus e caminhões, onde as especificações para as etapas do processo podem variar dependendo do destino final. Os *dtex* de fios de PET produzidos no Brasil são 1100, 1440, 1670 e 2200.

O PET (polietileno tereftalato) é um material cristalino, o que lhe confere uma estrutura rígida e elevada resistência à deformação. Sua alta cristalinidade também reduz o encolhimento, dificultando alterações dimensionais. Além disso, o PET apresenta boa estabilidade térmica, sendo capaz de resistir a temperaturas elevadas sem sofrer grandes quebras em suas ligações químicas. Essas características fazem do PET um material ideal para aplicações que exigem rigidez, durabilidade e resistência ao calor.

## 2.2 Bagaço de cana-de-açúcar

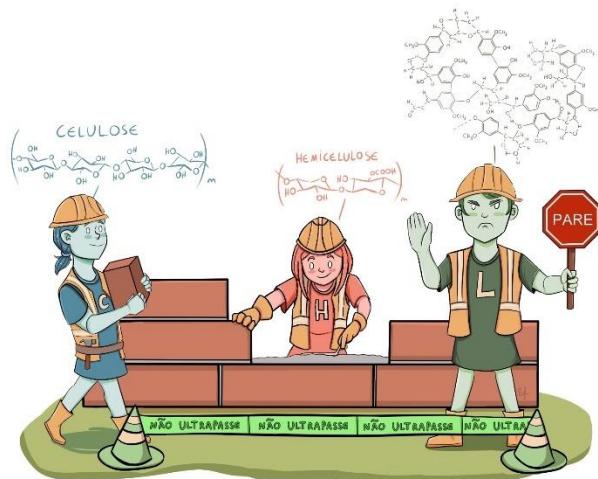
O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Sua produção corresponde a 38% do total global (FAOSTAT, 2023), o que equivale a aproximadamente 724 milhões de toneladas por ano (IBGE, 2022). Após o processamento da cana, são gerados resíduos agroindustriais que frequentemente são incinerados como meio de disposição de resíduos sólidos, devido ao seu excesso. Esse processo gera impacto ambiental negativo, uma vez que resulta na emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para a diminuição da qualidade do ar (Alokika *et al.*, 2021).

Cerca de 28% dos resíduos gerados na produção correspondem ao bagaço de cana-de-açúcar, ou seja, 280 quilos de bagaço para cada tonelada de cana (Fioranelli; Bizzo, 2023). O bagaço contém, em média, 40-45% de celulose, 20-25% de hemicelulose, 17-20% de lignina, 1-3% de cinzas e 5-7% de extractos (Carvalho *et al.*, 2015; Mokhena *et al.*, 2018;

Mahmud; Anannya, 2021). Trata-se de um resíduo de baixo custo, abundante, sustentável, biodegradável, não tóxico, cuja reutilização pode ajudar a reduzir o impacto ambiental da agroindústria (Khongchamnan *et al.*, 2022; Zafeer *et al.*, 2023).

Esse resíduo apresenta um alto teor de celulose quando comparado a outros resíduos agroindustriais. A celulose, por sua vez, possui uma estrutura altamente cristalina — índice de cristalinidade de aproximadamente 35% — e grupos hidroxilas em sua superfície, o que favorece a interação e adesão com outros compostos. Na literatura, a maioria dos compósitos apresentou melhorias em suas propriedades mecânicas quando acrescidos de até 20% de bagaço de cana-de-açúcar como reforço, demonstrando o potencial da fibra para essa finalidade (Devadiga *et al.*, 2020; Mokhena *et al.*, 2018; Ibrahim *et al.*, 2020).

Figura 2 - Principal conteúdo do bagaço de cana-de-açúcar: em azul, a celulose é responsável pela construção da célula vegetal, o esqueleto.



Nota: Em vermelho a hemicelulose é responsável por ligar as estruturas da célula vegetal, a celulose e a lignina. Em verde, a lignina é o “protetor” da célula, dificultando o acesso a celulose e hemicelulose, a parte mais rígida e exposta da célula vegetal.

Fonte: Esther Farias.

A celulose é um polímero linear composto por unidades de glicose conectadas por ligações denominadas  $\beta$ -1,4-glicosídicas. Ela possui ligações de hidrogênio inter e intramoleculares, que são responsáveis por manter a molécula unida e formar as estruturas cristalinas. Essas estruturas são altamente compactas, tornando a celulose insolúvel na maioria dos solventes e resistente à degradação química e biológica (Bao *et al.*, 2018; Sun

et al., 2022). Apesar de o compósito se beneficiar da estrutura robusta e cristalina da celulose, que melhora suas propriedades mecânicas, é necessário atentar-se à possível dificuldade de integrar essa molécula em uma matriz polimérica predominantemente apolar. Sua característica hidrofílica, que também é responsável pela absorção de umidade, pode prejudicar as propriedades mecânicas finais do compósito (Bao *et al.*, 2018; Devadiga *et al.*, 2020).

Ao contrário da celulose, a hemicelulose é amorfã e altamente ramificada, sendo composta por diferentes unidades poliméricas, como xilose, manose, arabinose e glicose, com o xilano sendo o modelo tipicamente usado para representá-la (Zafeer *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2022). Apesar de agir como um material de ligação e preenchimento entre a celulose hidrofílica e a lignina hidrofóbica, a hemicelulose é termicamente e quimicamente instável, o que prejudica as propriedades mecânicas finais do compósito (Mokhena *et al.*, 2018; Sun *et al.*, 2022). É interessante ressaltar que a celulose e a hemicelulose possuem um alto teor de hidroxilas, o que contribui para a formação de pontes de hidrogênio com o plastificante, unindo as partes hidrofóbicas e hidrofílicas do compósito. Entretanto, devido à estrutura amorfã e à baixa cristalinidade da hemicelulose, ela enfraquece o compósito, como observado por Chow *et al.* (2007), diminuindo sua estabilidade dimensional.

A lignina é um polímero amorfó e ramificado, composto pela polimerização desordenada de três unidades de fenilpropano: p-hidroxifenil, guaiacil e siringil, que podem possuir proporções variadas dependendo da fonte da biomassa (Collard; Blin, 2014; Sun *et al.*, 2022). Ela age como uma barreira de proteção na parede celular e dificulta o acesso à celulose e hemicelulose (Carvalho *et al.*, 2015), o que, em um compósito, pode afetar negativamente a adesão com o plastificante ou com a matriz polimérica (Zafeer *et al.*, 2015).

Para garantir o acesso à celulose, é desejável que a biomassa passe por um pré-tratamento capaz de remover as estruturas amorfas sem danificá-la. Bachtiar *et al.* (2008) estudaram a criação de um compósito formado por fibras de açúcar de palma em uma matriz polimérica de epóxi. O tratamento alcalino foi utilizado para melhorar as propriedades de tensão, obtendo sucesso tanto na resistência à tração quanto no módulo de Young. Este último chegou a aproximadamente 400 MPa a mais com o pré-tratamento com 0,25 M de NaOH por 4 horas, mas diminuiu após este período. Bachtiar *et al.* (2008) atribuiram essa melhora à diminuição da natureza hidrofílica da fibra, o que, consequentemente, melhora a

adesão entre a matriz e a fibra. Vale ressaltar que uma maior concentração da solução alcalina obteve resultados inferiores, devido à intensa degradação da fibra.

Mu *et al.* (2017) observaram que um alto teor de extractivos presente na palha de arroz implica em uma baixa adesão interfacial, tornando o compósito frágil, pois enfraquece as interações entre a fibra e o agente de acoplamento. Os autores também mencionam que o tamanho das fibras impacta a absorção de água, como observado no bagaço de cana-de-açúcar, que, por possuir fibras grandes, apresentou alta absorção.

Bartos *et al.* (2021), ao estudarem o reforço do ácido poliláctico (PLA) com bagaço de cana, notou um aumento significativo da rigidez e da resistência ao impacto, mantendo uma resistência à tração constante. Este estudo está em concordância com Mulinari *et al.* (2009) e Rodrigues, Maia e Mulinari (2011), que também encontraram melhorias nas propriedades mecânicas dos compósitos com polietileno de alta densidade e resina de poliéster, respectivamente. Vale ressaltar que este último observou melhorias nas propriedades mecânicas em relação ao polímero puro após pré-tratar o bagaço de cana-de-açúcar por esterificação com anidrido acético, tolueno, ácido acético e ácido perclórico. Esse pré-tratamento removeu extractivos, aumentando a área de contato da matriz polimérica com a fibra, elevou a rugosidade e modificou quimicamente a fibra, resultando em uma melhor compatibilidade com o polímero.

Cerqueira, Baptista e Mulinari (2011) estudaram o reforço de polipropileno com bagaço de cana-de-açúcar, utilizando de 5% a 20% de acréscimo de fibra após pré-tratamento ácido combinado com deslignificação alcalina. Em todos os casos, o reforço foi bem-sucedido, obtendo melhorias nas propriedades mecânicas. Arrakhiz *et al.* (2013) trabalharam com porcentagens de fibra um pouco maiores, de 25% a 30%, reforçando também o polipropileno após pré-tratamento alcalino. Como nos estudos anteriores, o pré-tratamento melhorou a compatibilidade com a matriz, e o compósito apresentou melhorias nas propriedades mecânicas, alcançando resultados ótimos na concentração máxima de fibras estudada (30%).

Prasad *et al.* (2020) também optaram pelo pré-tratamento alcalino para formar compósitos com epóxi e observou um aumento nas propriedades mecânicas finais do compósito. Isso foi atribuído à melhoria na ligação com a matriz, devido à redução da camada de cera presente na fibra, à diminuição dos grupos hidroxila no bagaço (reduzindo a

quantidade de água absorvida) e à fibrilação, que aumentou a área de superfície de contato. Além disso, o autor notou que fibras de 10 mm resultaram em compósitos com maior dureza e resistência à tração, sugerindo que este é o tamanho ideal para dispersão na matriz polimérica.

Sem um pré-tratamento da fibra, também é possível obter melhorias nas propriedades de um compósito. Anggono *et al.* (2019) utilizaram polipropileno maleado (maleated polypropylene) para melhorar a compatibilidade entre o bagaço de cana-de-açúcar e a matriz de polipropileno. A fibra mostrou-se eficaz como reforço, aumentando a rigidez e a resistência ao impacto, porém diminuiu a resistência à tração. O autor ressalta que o tamanho da fibra pode impactar negativamente a dispersão do compósito, prejudicando as propriedades mecânicas. Por isso, deve-se melhorar a granulometria do bagaço de cana-de-açúcar para obter fibras menores.

Chow *et al.* (2007) utilizaram sisal para reforçar um biocompósito com matriz de polipropileno. O compósito foi imerso em água para avaliar como a absorção de água afetaria suas propriedades mecânicas. Para garantir uma boa adesão entre os componentes, foi utilizada cera de polipropileno enxertada com anidrido maleico como compatibilizante, que se mostrou eficiente em proporcionar uma forte adesão interfacial. Eles observaram que a absorção de água pelo compósito aumentou com a quantidade de sisal. Além disso, o aumento do tempo de imersão em água diminuiu o módulo de Young, o alongamento à ruptura e a resistência à tração, mas aumentou a resistência ao impacto. Esse comportamento foi atribuído ao inchaço das fibras de sisal com a absorção de água, que, consequentemente, aumenta o atrito entre as fibras e a matriz polimérica, contribuindo para a dissipação de energia durante o impacto. Assim, a resistência ao impacto aumenta, enquanto essa exposição à água pode, ao mesmo tempo, enfraquecer as ligações entre fibra e matriz, comprometendo a adesão interfacial e tornando a fibra de sisal mais frágil. Isso resultou em uma menor capacidade do material de distribuir a tensão aplicada, impactando negativamente as outras propriedades mecânicas.

O aumento da quantidade de fibra pode contribuir para a melhoria das propriedades mecânicas. Contudo, também resulta em um aumento da umidade devido às hidroxilas livres disponíveis na biomassa, que, como relatado por Chow *et al.* (2007), enfraquece a adesão interfacial entre a fibra e a matriz.

*Yao et al.* (2008) estudaram as fibras da palha de arroz completas e individualmente (cascas, folhas e caules), juntamente com a fibra de madeira, sem pré-tratamento e sem agente compatibilizante, reforçando a matriz polimérica de polietileno de alta densidade (PEAD) virgem e reciclado. Em concordância com os estudos anteriores, todas as fibras apresentaram resultados de resistência à tração e ao impacto menores do que ambas as matrizes puras, com uma única exceção: o compósito de PEAD virgem com a casca de arroz obteve maior resistência ao impacto do que as demais fibras. O aumento da quantidade de fibra no compósito diminuiu as resistências em todos os casos, provavelmente devido à diminuição da adesão interfacial no compósito.

*Motaung et al.* (2017) estudaram a formação de compósitos a partir da fabricação de nylon com reforço de bagaço de cana. Eles destacam a importância da dispersão do reforço no compósito, pois obteve resultados positivos ao melhorar as propriedades térmicas e mecânicas, o que gerou um compósito robusto e estável.

### 2.3 Plastificantes

Um plastificante é essencial para um compósito reforçado por fibras naturais, pois permite que a matriz sintética seja processada abaixo de sua temperatura de fusão cristalina, que degradaria as fibras, além de aumentar sua flexibilidade e maleabilidade (Santos *et al.*, 2014; Chollakup; Smitthipong; Suwanruji, 2012). Em geral, plastificantes possuem afinidade suficiente com ambas as substâncias para interagir fisicamente, melhorando propriedades físicas e a processabilidade do compósito. O mecanismo de atuação de um plastificante baseia-se na sua capacidade de se inserir na matriz polimérica, promovendo o afastamento das cadeias. Esse efeito reduz as forças de interação intermoleculares, como as forças de van der Waals, resultando na diminuição da rigidez da matriz e no aumento de sua flexibilidade. Esse aumento na mobilidade das cadeias gera um espaço entre elas, necessário para a dispersão eficiente da fibra, pois esta interage com o plastificante que está inserido na matriz, facilitando a incorporação da fibra na matriz polimérica. No entanto, plastificantes geralmente não são capazes de criar ligações químicas entre o reforço e a matriz (Godwin, 2024).

Com a crescente preocupação em transformar os processos em mais sustentáveis, o interesse em plastificantes naturais tem aumentado. Eles se caracterizam por sua baixa

toxicidade, origem em fontes renováveis e biodegradabilidade. Entre eles estão óleos vegetais triglicerídeos epoxidados, como óleo de soja, óleo de linhaça, óleo de mamona, óleo de girassol e ésteres de ácidos graxos (Vieira *et al.*, 2011).

Biocompósitos de fibras naturais com matrizes poliméricas sintéticas são um tópico relevante de estudo na literatura, com o objetivo de encontrar um destino adequado para os resíduos da indústria petroquímica e agroindustrial. A adição de um plastificante é crucial para garantir uma boa processabilidade dos componentes de naturezas e polaridades diferentes. É de suma importância que esses compostos sejam sustentáveis, a fim de alinhar-se com os objetivos do estudo.

### 2.3.1 Glicerol

O propanetriol, conhecido comercialmente como glicerol ou glicerina, é o triol mais simples. Ele possui uma gama de funções nas indústrias farmacêutica, alimentícia e cosmética. Pode ser encontrado em todas as gorduras e óleos naturais, sendo também um intermediário importante no metabolismo de todos os organismos (Tan *et al.*, 2013; Christoph *et al.*, 2006). O glicerol pode ser produzido a partir de plantas de biodiesel por meio de reações de transesterificação ou por saponificação ou hidrólise em plantas oleoquímicas. Esse glicerol, denominado bruto, contém diversas impurezas que dependem do tipo de processo específico utilizado em sua fabricação (Tan *et al.*, 2013).

Ele não é tóxico para humanos nem para o meio ambiente, contém uma cadeia de três carbonos com uma hidroxila ligada a cada um deles e pode ser derivado de fontes naturais ou petroquímicas. Possui sabor adocicado, é viscoso, higroscópico, incolor e inodoro (Donkin, 2008).

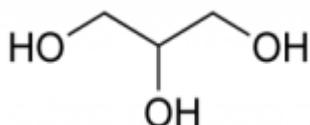
Tabela 2 - Propriedades físicas do glicerol

Propriedades	
Ponto de fusão (°C)	18
Ponto de ebulação (°C)	290
Massa molar (g/mol)	92,0 9
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,26
Viscosidade (cP)	648

Fonte: Christopher *et al.* (2006)

O glicerol forma interações através de pontes de hidrogênio intermoleculares ao longo de toda a sua extensão. Essas interações são fortes e, por isso, ocasionam uma viscosidade e um ponto de ebulição muito altos no composto. A presença de grupos alcoólicos primários e secundários o torna uma molécula reativa, capaz de sofrer um grande número de substituições (Tan *et al.*, 2013).

Figura 3 - Estrutura do glicerol



Fonte: Źolek-Tryznowska e Cichy (2018)

Esses grupos funcionais são, em sua maioria, responsáveis pelo sucesso do glicerol como plastificante. O glicerol pode formar interações através de pontes de hidrogênio com as partes polares dos compostos, diminuindo a interação molecular entre as moléculas da própria substância e espaçando as cadeias da matriz (Hammann; Schmid, 2014). Essa separação permite que o glicerol preencha os espaços vazios da cadeia polimérica, aumentando a flexibilidade e melhorando a adesão entre a fibra e a matriz. Isso ocorre porque, além de preencher os espaços vazios e aumentar a área de contato efetiva entre os materiais, interações de hidrogênio são formadas entre a fibra e o glicerol, bem como entre o glicerol e a matriz (Mattox, 2010; Labasan *et al.*, 2015; Karim *et al.*, 2022).

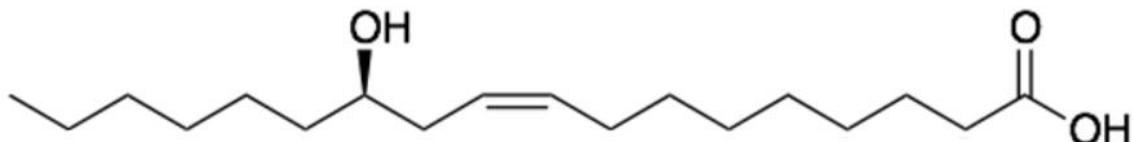
Ao misturar fibras de bambu com uma combinação de polietileno e poliestireno, Labasan *et al.* (2015) compararam o glicerol com o óleo de soja, pois ambos têm a capacidade de interagir com a fibra natural devido à presença de hidroxilas. Apesar de permanecerem em fases separadas, esses compostos melhoraram a interação com a matriz polimérica (Labasan *et al.*, 2015; Mattox, 2010). Ainda neste estudo, os autores demonstram que o uso de glicerol é superior ao uso do óleo de soja, pois apresenta maior desempenho em propriedades mecânicas, não possui odor desagradável e interage melhor com as fibras naturais. Aguiar *et al.* (2022) também obteve sucesso ao utilizar glicerol como plastificante para o bagaço de cana-de-açúcar combinado com PET, reduzindo com eficácia a temperatura de fusão do polímero sintético. A proporção de 15% de fibra apresentou resistência à tração e Módulo de Young superiores ao plástico reciclado puro. No entanto, a

atividade antifúngica e a absorção de água aumentaram com a elevação da proporção de fibra. Karim *et al.* (2022) também encontraram sucesso ao utilizar glicerol como plastificante, aumentando a homogeneidade e a resistência à tração em 30% no filme de polietileno com amido.

### 2.3.2 Óleo de Mamona

O óleo de mamona é obtido a partir da compressão das sementes de mamona, planta nativa da África que é cultivada pelo seu óleo há cerca de 6.000 anos (Mutlu; Meier, 2010). O Brasil é um dos maiores produtores, ficando atrás apenas da Índia e Moçambique (FAOSTAT, 2022; Patel *et al.*, 2016). A produção no Brasil concentra-se principalmente no Nordeste, no semiárido, e é realizada por pequenos agricultores (EMBRAPA, 2022).

Figura 4 - Estrutura do ácido ricinoleico que é o principal componente do óleo de mamona



Fonte: Adaptado de Patel *et al.* (2016).

Tabela 3 - Propriedades físicas do óleo de mamona

Propriedades	
Ponto de fusão °C	-10
Ponto de ebulação °C	313
Massa molar (g/mol)	298, 4
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,95 9
Viscosidade (cP)	585

Fonte: PubChem (2024).

O óleo de mamona é mais denso e viscoso em comparação com um óleo lubrificante comum, devido à sua estrutura polar, que forma fortes ligações de hidrogênio (Patel *et al.*,

2016). Seu principal componente é o ácido ricinoleico, um ácido graxo que compõe 90% de sua composição (Dunford, 2012). Ele é um óleo viscoso, amarelado e não volátil (Patel *et al.*, 2016).

Apesar de não ser tóxico, ser abundante e sustentável, este óleo vegetal não é comestível, pois possui propriedades laxativas e nauseantes. Ele só é encontrado na indústria alimentícia como aditivo, ou seja, não compete com essa indústria quando utilizado como plastificante e é compatível com diversas resinas, polímeros e ceras sintéticas (Darie-Niță *et al.*, 2022). No estudo de Darie-Niță *et al.* (2022), os autores estudaram a incorporação do óleo de mamona no ácido poliláctico, de 5% a 20%, e obtiveram sucesso ao aumentar em 14 vezes a flexibilidade e estabilidade térmica do polímero, além de reduzir a viscosidade do PLA, melhorando sua processabilidade. O óleo de mamona também é capaz de preencher os espaços vazios das cadeias poliméricas após promover o seu afastamento através da diminuição das forças intermoleculares da matriz, perturbando as ligações intermoleculares entre as cadeias de PLA substituindo as ligações por pontes de hidrogênio entre PLA e plastificante. Esse mecanismo se assemelha ao do glicerol descrito por diversos autores na seção anterior (Mattox, 2010; Labasan *et al.*, 2015; Karim *et al.*, 2022).

O óleo de mamona também obteve sucesso ao ser acrescentado em compostos de borracha natural. Ele melhorou a resistência ao rasgo e a estabilidade térmica devido à presença de ácidos graxos livres. Raju, Nandanan e Kutty (2007) relataram que o óleo de mamona demonstrou ser um substituto potencial ao óleo naftênico, considerado um plastificante de referência em compostos de borracha. Kukreja *et al.* (2003) encontraram resultados semelhantes ao estudar a interação entre negro de fumo e borracha. O acréscimo de óleo de mamona aumentou a resistência à tração e ao rasgo dos compostos, melhorando a adesão entre as substâncias. O autor também relatou que o óleo foi capaz de atuar como plastificante.

Santos *et al.* (2014) estudaram a formação de compósitos de PET com fibras de sisal, com o auxílio de diversos plastificantes, entre eles o glicerol e o óleo de mamona. Os autores mencionam que os plastificantes escolhidos possuem potencial para atuar também como agentes compatibilizantes, já que os grupos funcionais presentes na estrutura dos plastificantes podem ter maior afinidade com os componentes da fibra de sisal e do PET, gerando maior adesão e interação entre eles.

Ainda nesse estudo, o óleo de mamona combinado com glicerol foi capaz de contribuir para o compósito, melhorando sua processabilidade, evitando a degradação das fibras de sisal, aumentando sua flexibilidade e diminuindo sua rigidez. O acréscimo de fibras em uma matriz polimérica geralmente causa um aumento na rigidez, porém isso foi superado com o uso dos plastificantes. Os autores explicaram que esses aditivos são capazes de reduzir as interações intermoleculares da cadeia polimérica, o que facilita sua movimentação.

Porém, Santos *et al.* (2014) relataram que, apesar de haver melhora na adesão interfacial, ambos os plastificantes não puderam ser considerados agentes compatibilizantes, já que a propriedade não aumentou o suficiente para ser comparável a agentes compatibilizantes tradicionais. Eles ainda relataram que outra substância utilizada – citrato de tributila – reduziu a mobilidade das cadeias na interface entre as fases do compósito, o que se refletiu no aumento da temperatura de transição vítreia em relação aos outros plastificantes. Apesar do óleo de mamona não ter se comportado como um agente compatibilizante, sua performance foi bem-sucedida ao melhorar a processabilidade e as propriedades mecânicas do compósito.

## 2.4 Moldagem por compressão

Santos *et al.* (2014) optaram pela moldagem por compressão para produzir compósitos de sisal, glicerol, óleo de mamona e PET. Este método consiste em submeter a mistura dos materiais a alta pressão e temperatura em um molde fechado. A mistura inicial foi a combinação de sisal com os plastificantes; em seguida, o PET (85% em peso) foi adicionado. Após isso, a composição foi colocada em um molde e submetida a diferentes temperaturas, sob a pressão constante de 38,08 Kgf/cm<sup>2</sup>. Os autores mencionaram que uma desvantagem é a necessidade de controle preciso da temperatura e pressão para evitar a degradação da fibra. Contudo, o método produz um compósito com distribuição de fibra satisfatória e permite controlar a forma final do material.

Hernández *et al.* (2021) também utilizaram moldagem por compressão para criar compósitos de Nylon 6 com fibras de agave. Usando um misturador mecânico a 250°C por 15 minutos, a matriz polimérica foi adicionada (33% em peso) até atingir o ponto de fusão. A fibra foi então incorporada e misturada até completar 15 minutos. A mistura foi levada ao molde de compressão à temperatura de 240-260°C e 0,4 MPa. Os compósitos formados

apresentaram melhorias nas propriedades mecânicas. Aguiar *et al.* (2022) também utilizaram compressão térmica para moldar compósitos, relatando que o método foi eficaz para os propósitos do estudo.

Suchaiya *et al.* (2020) optaram pela moldagem por compressão para preparar compósitos de PET reciclado com biocarvão das cascas de durião. Os autores relataram uma melhora na estabilidade térmica e mecânica do compósito, mas destacou que isso está fortemente associado ao agente compatibilizante utilizado.

## 2.5 Biocompósitos

Os compósitos são materiais formados pela combinação de duas ou mais substâncias, sendo geralmente uma destas a matriz e a outra o reforço. Essa combinação resulta em um material que apresenta propriedades térmicas e mecânicas superiores às de cada um de seus componentes isoladamente. Para ser classificado como um biocompósito, esse material deve ser composto por uma matriz polimérica (sintética ou natural) e um reforço natural (Manu *et al.*, 2022).

Esses reforços naturais podem ser madeira reciclada, resíduos agroindustriais e fibras naturais, como o bagaço de cana-de-açúcar (Ilyas; Sapuan, 2020). A escolha do reforço natural a ser utilizado depende da disponibilidade e do custo-benefício associado à criação do compósito. As fibras naturais, especificamente, têm atraído bastante atenção devido ao seu baixo custo, biodegradabilidade e menor risco à saúde quando comparadas aos seus equivalentes sintéticos, como fibras de carbono e aramida (Mahmud *et al.*, 2021).

Na tabela 4, é possível ver alguns exemplos de combinações de biocompósitos já estudados na literatura.

Tabela 4 – Biocompósitos na literatura.

Reforço	Matriz	Referência
Bagaço de cana-de-açúcar	PET	Aguiar <i>et al.</i> , 2022
Fibra de açúcar de palma	Epóxi	Bachtiar <i>et al.</i> , 2008
Sisal	Polipropileno	Chow <i>et al.</i> , 2007
Sisal	PET	Santos <i>et al.</i> , 2014
Bambu	Polietileno com Poliestireno	Labasan <i>et al.</i> , 2015

Palha de arroz	Polietileno de alta densidade (PEAD)	Mu <i>et al.</i> , 2021
Palha de trigo	Polietileno de alta densidade (PEAD)	Mu <i>et al.</i> , 2021
Casca de arroz	Polietileno de alta densidade (PEAD)	Mu <i>et al.</i> , 2021
Bagaço de cana-de-açúcar	Polietileno de alta densidade (PEAD)	Mu <i>et al.</i> , 2021
Bambu Moso	Polietileno de alta densidade (PEAD)	Mu <i>et al.</i> , 2021
Talo de algodão	Polietileno de alta densidade (PEAD)	Mu <i>et al.</i> , 2021
Amido de Mandioca e Cascas de Durião	PET	Suchaya; Sangmane, 2020
PET	Celulose	Xu <i>et al.</i> , 2020
Casca de arroz	Polipropileno	Yang <i>et al.</i> , 2004
Madeira	PEAD (Reciclado e Virgem)	Yao <i>et al.</i> , 2008
Casca de arroz	PEAD (Reciclado e Virgem)	Yao <i>et al.</i> , 2008
Haste de palha de arroz	PEAD (Reciclado e Virgem)	Yao <i>et al.</i> , 2008
Folhas da palha de arroz	PEAD (Reciclado e Virgem)	Yao <i>et al.</i> , 2008
Palha de arroz	PEAD (Reciclado e Virgem)	Yao <i>et al.</i> , 2008

Fonte: Própria Autora (2024).

Na literatura, foi observada a melhora das propriedades mecânicas, principalmente a resistência à tração, de diversos compósitos reforçados com o bagaço de cana, como demonstrado na tabela 5. O bagaço de cana-de-açúcar, amplamente produzido no Brasil, atualmente não possui aplicações de alto valor agregado. No entanto, suas propriedades são favoráveis para o uso como reforço em compósitos, especialmente quando combinado com resíduos plásticos do processo de produção de lonas de reforço para pneus. Encontrar um destino eficiente para ambos é de grande interesse para metas globais de sustentabilidade, ajudando a evitar a poluição e a reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Tabela 5 – Propriedades dos compósitos reforçados com bagaço de cana-de-açúcar.

Matriz	% de reforço	Propriedades analisadas	Sem reforço	Com reforço	Autor
Resina de poliéster	5	Resistência à tração (MPa) Módulo de Young (MPa)	19,7 894,3	11 1358,1	RODRIGUES; MAIA; MULINARI (2011)
Matriz de polietileno de alta densidade	10	Alongamento na ruptura (%) Resistência à tração (MPa)	1,96 16,7	1,62 14,4	MULINARI et al. (2009)

		Módulo de tração (MPa)	850,9	880,1	
Matriz de polipropileno	5	Resistência à tração (MPa)	35	31	ARRAKHIZ et al. (2013)
		Módulo (MPa)	1000	1100	
Matriz de polipropileno	10	Resistência à tração (MPa)	35	31	ARRAKHIZ et al. (2013)
		Módulo (MPa)	1000	1100	
Matriz de polipropileno	15	Resistência à tração (MPa)	35	33	ARRAKHIZ et al. (2013)
		Módulo (MPa)	1000	1300	
Matriz de polipropileno	20	Resistência à tração (MPa)	35	31	ARRAKHIZ et al. (2013)
		Módulo (MPa)	1000	1350	
Pellet de polipropileno	5	Resistência à tração (MPa)	19,3	22,9	CERQUEIRA; BAPTISTA; MULINARI (2011)
		Módulo (MPa)	955,1	1105	
Pellet de polipropileno	10	Resistência à tração (MPa)	19,3	23	CERQUEIRA; BAPTISTA; MULINARI (2011)
		Módulo (MPa)	955,1	1027,1	
Pellet de polipropileno	20	Resistência à tração (MPa)	19,3	22,3	CERQUEIRA; BAPTISTA; MULINARI (2011)
		Módulo (MPa)	955,1	1142,5	
Pellet de polietileno teraftalato	10	Resistência à tração (MPa)	22	18	AGUIAR et al. (2022)
		Módulo (MPa)	2	2	
Pellet de polietileno teraftalato	15	Resistência à tração (MPa)	22	23	AGUIAR et al. (2022)
		Módulo (MPa)	2	3	
Pellet de polietileno teraftalato	20	Resistência à tração (MPa)	22	21	AGUIAR et al. (2022)
		Módulo (MPa)	2	3	

Fonte: Própria autora (2024)

### 3 MATERIAIS

#### 3.1 Materiais poliméricos

O resíduo de fios industriais foi doado pela empresa KordSA Brasil, em Camaçari, Bahia.

- Fio cru de PET: O fio cru de PET, utilizado como matriz polimérica, é um resíduo proveniente da primeira etapa do processo de fabricação de lonas para pneus. O fio foi doado pela empresa KordSA Brasil, localizada em Camaçari, Bahia.
- Resíduo em pó fino do grão de PET: O resíduo em pó fino do grão de PET é obtido a partir do processamento mecânico do polímero, resultando em partículas de uma granulometria diferente da especificada para as etapas seguintes do processo. O resíduo foi doado pela empresa KordSA Brasil, localizada em Camaçari, Bahia.

#### 3.2 Bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço utilizado encontra-se disponível no Núcleo de Química Verde (NQV/UFBA) e foi caracterizado conforme descrito na tese de Campos (2017). O percentual de seus componentes foi encontrado como 39,62% de celulose, 20,47% de hemicelulose e 24,61% de lignina.

#### 3.3 Plastificantes

Utilizou-se glicerina P.A. da marca Synth, com fórmula molecular  $C_3H_8O_3$  e pureza mínima de 99,5%, analítica. O óleo de mamona da empresa Quimisul SC possui laudo comprovando que o óleo está dentro dos padrões analíticos esperados, com valores de índice de iodo, acidez livre, índice de hidroxila e índice de saponificação dentro das faixas especificadas.

## 4 MÉTODOS

### 4.1 Secagem das matérias primas

Os resíduos poliméricos foram colocados em estufa a 120 °C por 16 horas para a remoção da umidade. O bagaço de cana-de-açúcar foi lavado, moído e peneirado entre 35 e 60 mesh. Em seguida, foi colocado na estufa a 120 °C por 16 horas para a remoção da umidade. A estufa de secagem e aquecimento, da marca BINDER, modelo FD 56, foi fabricada em 2016. A estufa possui uma temperatura nominal máxima de 300 °C e utiliza circulação de ar forçada para assegurar melhor uniformidade de temperatura.

### 4.2 Análise Termogravimétrica (TG)

O estudo da decomposição térmica dos resíduos e do bagaço de cana-de-açúcar foi realizado por meio de análises TGA, para determinar as curvas de perda de massa. Foi utilizado o equipamento Seyko TGD/DTA SII 6200, no qual as análises foram realizadas em atmosfera de nitrogênio com vazão de 50 L/min, utilizando cadiño de platina de 70  $\mu\text{L}$  e taxa de aquecimento de 10 °C/min, desde a temperatura ambiente até 250 °C para o bagaço e 450 °C para os resíduos de PET. A massa de amostra utilizada foi de aproximadamente 10 mg. O equipamento está localizado no Laboratório do Grupo de Energia e Ciência dos Materiais na UFBA.

### 4.3 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

As análises de FTIR foram realizadas no laboratório central analítico do PPEQ, na UFBA. O equipamento utilizado foi o Shimadzu IRPrestige-21, com sistema óptico de feixe único, detector DTGS e acessório de reflectância total atenuada (ATR). As amostras foram preparadas por meio da mistura com brometo de potássio (KBr) e prensadas, formando pastilhas. A leitura das amostras foi realizada na faixa de 4000–400  $\text{cm}^{-1}$ .

### 4.4 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

As análises de DSC foram realizadas no laboratório central analítico do PPEQ, na UFBA, utilizando cadiños de alumínio selados. O equipamento utilizado foi o Shimadzu

DSC-60 Plus. As amostras de resíduo polimérico foram aquecidas até 350 °C com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, em atmosfera de nitrogênio com vazão controlada de 50 mL/min. Após o primeiro aquecimento, os resíduos poliméricos foram resfriados lentamente até 150 °C e mantidos até o equipamento atingir a temperatura ambiente. Em seguida, uma segunda corrida foi realizada com os mesmos parâmetros, sem influência de memória térmica. Para a amostra de bagaço de cana-de-açúcar, foi feita apenas uma corrida até 300 °C com os mesmos parâmetros anteriores.

#### 4.5 Moldagem por Compressão

Os compósitos foram formados utilizando 25% em peso de plastificante com reforço de 2,5%, 5% e 10% em peso, conforme as condições estabelecidas na tabela 6 para cada respectiva matriz. A prensa hidráulica da marca Phi contém dois pratos, três indicadores, dois manômetros e pressão máxima de 40.000 lbs.

Tabela 6 – Condições de teste

Pressão (lbs.força )	Temperatur a (C°)	Temp o (min)	Amostras
15000	250	5	Amostras utilizando resíduo de grão polimérico de PET (iniciadas com C): CG1, CG2, CG25_1, CG25_2, CG5_1, CG5_2, CG10_1, CG10_2, CO1, CO2, CO25_1, CO25_2, CO5_1, CO5_2, CO10_1, CO10_2
10000	240	5	Amostras utilizando resíduo de fio cru (iniciadas com F): FP1, FP2, FG1, FG2, FB1, FB2, FBG25_1, FBG25_2, FBG5_1, FBG5_2, FBG10_1, FBG10_2, FO1, FO2, FB1, FB2, FBO25_1, FBO25_2, FBO5_1, FBO5_2, FBO10_1, FBO10_2

Fonte: Própria Autora (2024).

A identificação da amostra iniciada com C indica que a matriz polimérica foi o pó residual dos grãos de PET. Iniciada com F, a matriz foi o fio cru. A combinação CO/FO indica que o plastificante usado foi óleo de mamona, e CG/FG, glicerol. Os números que seguem indicam a porcentagem do bagaço de cana-de-açúcar utilizada. CO2,5 indica 2,5%; CO5, 5%; CO10, 10% e assim sucessivamente. Uma ID sem um número junto às letras indica que não foi utilizado bagaço de cana-de-açúcar na amostra. Os números seguidos de underline

(\_) indicam a repetição da condição. Para as amostras com fio cru, foram feitos testes com apenas o bagaço (2,5%), indicados por FB1 e FB2.

Figura 5 - Molde utilizado para formação dos compósitos à esquerda e o mesmo molde dentro da prensa utilizada.



Fonte: Própria Autora (2024).

Tabela 7 - Identificação das amostras

Identificação	Significado
CG1	Amostra utilizando pó residual de grãos de PET com glicerol, repetição 1.
CG2	Amostra utilizando pó residual de grãos de PET com glicerol, repetição 2.
CG25_1	Amostra utilizando pó residual de grãos de PET com glicerol e 2,5% de bagaço, repetição 1.
CG25_2	Amostra utilizando pó residual de grãos de PET com glicerol e 2,5% de bagaço, repetição 1.
CG5_1	Amostra utilizando pó residual de grãos de PET com glicerol e 5% de bagaço, repetição 1.
CG5_2	Amostra utilizando pó residual de grãos de PET com glicerol e 5% de bagaço, repetição 2.
CG10_1	Amostra utilizando pó residual de grãos de PET com glicerol e 10% de bagaço, repetição 1.
CG10_2	Amostra utilizando pó residual de grãos de PET com glicerol e 10% de bagaço, repetição 2.
CO1	Amostra utilizando pó residual de grãos de PET com óleo de mamona, repetição 1.
CO2	Amostra utilizando pó residual de grãos de PET com óleo de mamona, repetição 2.
CO25_1	Amostra utilizando pó residual de grãos de PET com óleo de mamona e 2,5% de bagaço, repetição 1.
CO25_2	Amostra utilizando pó residual de grãos de PET com óleo de mamona e 2,5% de bagaço, repetição 1.
CO5_1	Amostra utilizando pó residual de grãos de PET com óleo de mamona e 5% de bagaço, repetição 1.
CO5_2	Amostra utilizando pó residual de grãos de PET com óleo de mamona e 5% de bagaço, repetição 2.

CO10_1	Amostra utilizando pó residual de grãos de PET com óleo de mamona e 10% de bagaço, repetição 1.
CO10_2	Amostra utilizando pó residual de grãos de PET com óleo de mamona e 10% de bagaço, repetição 2.
FP1	Amostra utilizando fio cru de PET, repetição 1.
FP2	Amostra utilizando fio cru de PET, repetição 2.
FG1	Amostra utilizando fio cru de PET com glicerol, repetição 1.
FG2	Amostra utilizando fio cru de PET com glicerol, repetição 2.
FB1	Amostra utilizando fio cru de PET e 2,5% de bagaço, repetição 1.
FB2	Amostra utilizando fio cru de PET e 2,5% de bagaço, repetição 2.
FBG25_1	Amostra utilizando fio cru de PET com glicerol e 2,5% de bagaço, repetição 1.
FBG25_2	Amostra utilizando fio cru de PET com glicerol e 2,5% de bagaço, repetição 2.
FBG5_1	Amostra utilizando fio cru de PET com glicerol e 5% de bagaço, repetição 1.
FBG5_2	Amostra utilizando fio cru de PET com glicerol e 5% de bagaço, repetição 2.
FBG10_1	Amostra utilizando fio cru de PET com glicerol e 10% de bagaço, repetição 1.
FBG10_2	Amostra utilizando fio cru de PET com glicerol e 10% de bagaço, repetição 2.
FO1	Amostra utilizando fio cru de PET com óleo de mamona, repetição 1.
FO2	Amostra utilizando fio cru de PET com óleo de mamona, repetição 2.
FB1	Amostra utilizando fio cru de PET e 2,5% de bagaço, repetição 1.
FB2	Amostra utilizando fio cru de PET e 2,5% de bagaço, repetição 2.
FBO25_1	Amostra utilizando fio cru de PET com óleo de mamona e 2,5% de bagaço, repetição 1.
FBO25_2	Amostra utilizando fio cru de PET com óleo de mamona e 2,5% de bagaço, repetição 2.
FBO5_1	Amostra utilizando fio cru de PET com óleo de mamona e 5% de bagaço, repetição 1.
FBO5_2	Amostra utilizando fio cru de PET com óleo de mamona e 5% de bagaço, repetição 2.
FBO10_1	Amostra utilizando fio cru de PET com óleo de mamona e 10% de bagaço, repetição 1.
FBO10_2	Amostra utilizando fio cru de PET com óleo de mamona e 10% de bagaço, repetição 2.

#### 4.6 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos de resistência à tração no ponto de ruptura foram realizados no dinamômetro da marca Instron disponibilizado pela empresa KordSA. A distância entre as garras foi de 15 mm e a velocidade de 100 mm/min. A pressão utilizada nas garras foi de 5 bar e célula de carga 1Kn.

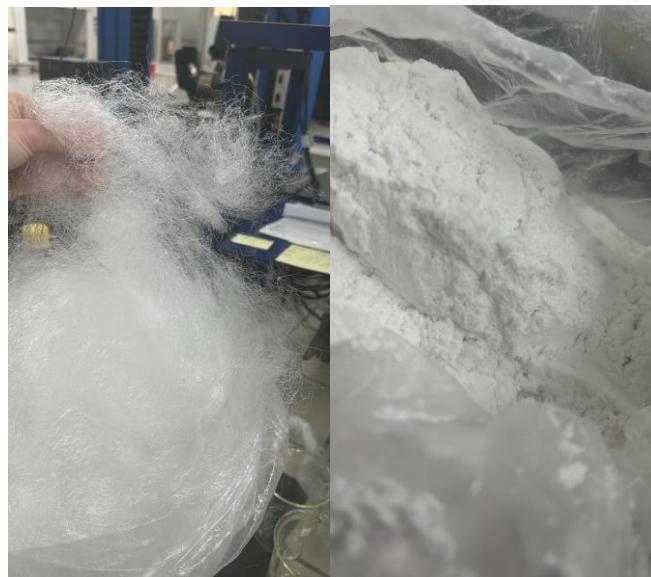
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, os componentes foram analisados individualmente para compreender seu comportamento na formação dos compósitos. Em seguida, os compósitos formados foram avaliados com base na força de ruptura, espessura e características físicas, agrupados de acordo com a fonte da matriz polimérica.

### 5.1 Análises das matérias primas

As matérias primas utilizadas foram fio cru e pó residual do grão de PET (Figura 6).

Figura 6 - Fio cru (esquerda) e resíduo em pó fino do grão de PET (direita).



Fonte: Própria Autora (2024)

O fio cru é obtido após a etapa de extrusão do grão de PET, ou seja, o material já passou por um processo de aquecimento e pressão. Esse processamento inicial torna o resíduo de fio cru menos resistente em comparação ao grão de PET virgem, permitindo que ele seja reutilizado em condições de temperatura e pressão mais baixas do que as necessárias para o material virgem. Esse material também é bastante volumoso, o que dificulta sua transformação na moldagem por compressão térmica, impactando a formação do compósito e a distribuição do reforço nesta matriz.

Tabela 8 - Massas dos componentes utilizados por compósito

ID	Polímero (g)		Perda de Umidade (%)	Bagaço de Cana-de-açúcar		Perda de Umidade (%)	Plastificante (g)
	Úmido (g)	Seco (g)		Úmido (g)	Seco (g)		
CG1	16,071	16,016	0,34%	-	-	-	4,025
CG2	15,963	15,903	0,37%	-	-	-	4,031
CG25_1	16,182	16,073	0,67%	0,426	0,382	10,29%	4,109
CG25_2	15,998	15,956	0,26%	0,408	0,380	6,89%	4,048
CG5_1	16,027	16,003	0,15%	0,804	0,743	7,58%	4,043
CG5_2	16,081	16,059	0,14%	0,805	0,750	6,84%	3,987
CG10_1	16,011	15,950	0,38%	1,614	1,445	10,42%	4,234
CG10_2	16,012	15,929	0,52%	1,610	1,483	7,90%	4,403
CO1	16,004	15,939	0,41%	-	-	-	4,087
CO2	16,041	15,995	0,29%	-	-	-	3,992
CO25_1	16,032	15,914	0,74%	0,402	0,360	10,26%	4,116
CO25_2	16,007	15,938	0,43%	0,409	0,374	8,65%	4,061
CO5_1	16,001	15,914	0,54%	0,813	0,743	8,61%	4,003
CO5_2	16,095	15,987	0,67%	0,815	0,739	9,36%	4,239
CO10_1	15,990	15,854	0,85%	1,601	1,449	9,53%	4,546
CO10_2	16,010	15,947	0,39%	1,601	1,466	8,41%	4,028
FP1	7,981	7,916	0,83%	-	-	-	-
FP2	7,974	7,914	0,75%	-	-	-	-
FG1	7,940	7,880	0,76%	-	-	-	2,001
FG2	8,073	7,988	1,06%	-	-	-	2,120
FB1	7,953	7,905	0,61%	0,203	0,183	9,89%	-
FB2	8,069	8,034	0,44%	0,207	0,186	10,41%	-
FBG25_1	7,981	7,939	0,52%	0,204	0,186	8,62%	2,054
FBG25_2	7,937	7,901	0,45%	0,199	0,179	9,88%	2,087
FBG5_1	8,093	8,041	0,64%	0,448	0,412	7,99%	2,132
FBG5_2	7,989	7,956	0,41%	0,407	0,373	8,38%	2,255
FBG10_1	8,072	8,009	0,78%	0,811	0,728	10,18%	2,005
FBG10_2	8,042	7,982	0,74%	0,809	0,724	10,58%	2,117
FO1	8,088	8,083	0,06%	-	-	-	2,062
FO2	8,015	7,951	0,79%	-	-	-	2,038
FB1	8,032	8,007	0,31%	0,254	0,229	9,62%	-
FB2	7,990	7,949	0,52%	0,227	0,204	9,85%	-
FBO25_1	8,048	8,047	0,01%	0,221	0,199	10,22%	2,122
FBO25_2	8,046	8,014	0,40%	0,211	0,191	9,12%	1,988
FBO5_1	8,011	7,992	0,23%	0,426	0,388	8,99%	2,128
FBO5_2	7,976	7,904	0,90%	0,423	0,387	8,48%	2,060
FBO10_1	7,963	7,926	0,47%	0,800	0,716	10,45%	2,077
FBO10_2	7,973	7,905	0,85%	0,843	0,763	9,48%	2,183

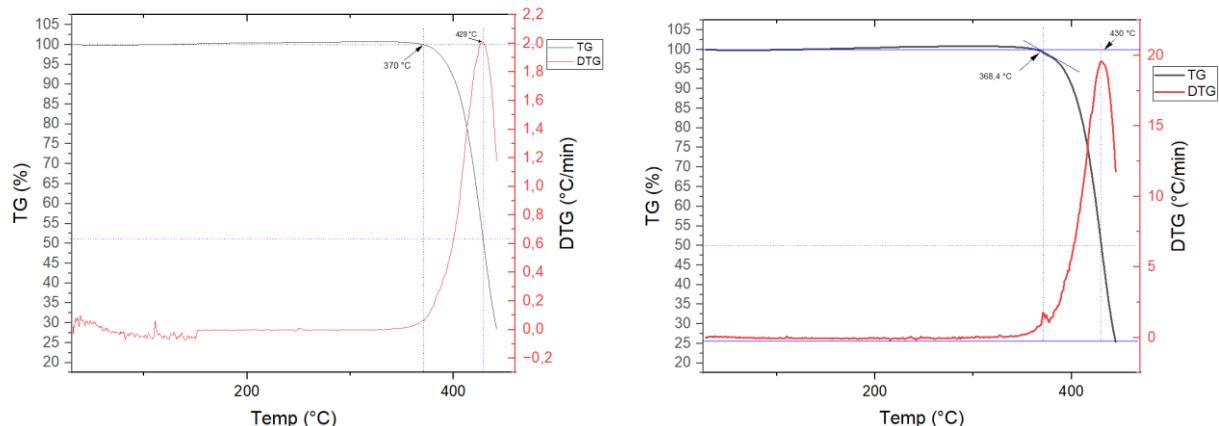
Fonte: Própria Autora (2024).

A remoção de umidade é essencial na formação de biocompósitos, porque a presença de água nas fibras naturais compromete suas propriedades mecânicas e estabilidade estrutural. A absorção de umidade provoca o inchaço das fibras, gerando tensões internas que enfraquecem a adesão entre as fibras e a matriz polimérica (Réquile et al., 2019). Os dois resíduos de PET tiveram sua umidade superficial reduzida em menos de 1% em todos os casos; já o bagaço variou entre 6,8% e 10,6% de umidade removida. A perda de umidade foi calculada a partir da diferença em peso dos materiais após secagem em estufa.

### 5.1.1 Análise termogravimétrica (TG)

A análise termogravimétrica foi utilizada para estudar a estabilidade térmica e os estágios de decomposição dos componentes do compósito, permitindo a observação da perda de massa de cada material e seu comportamento com o aumento gradual de temperatura. Esse método é crucial para identificar a faixa de temperatura em que o compósito pode ser processado e utilizado sem comprometer sua integridade.

Figura 7 - Análise Termogravimétrica do fio cru de PET (esquerda) e do pó residual de grão de PET (direita)



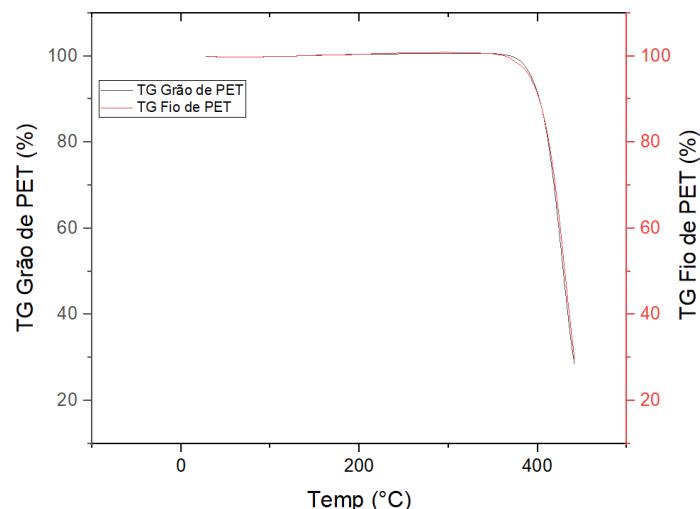
Fonte: Própria Autora (2024).

A análise termogravimétrica do fio cru de PET, obtido após extrusão, e do grão de PET virgem mostra comportamentos térmicos que acompanham a literatura e são praticamente idênticos. Até cerca de 100 °C, houve uma perda de massa inferior a 1%, correspondente à eliminação de voláteis (oligômeros) presentes no material, inclusive a umidade, em ambas

as amostras. Conforme demonstram as figuras, a degradação de ambos os materiais ocorre em um único evento. O pó residual do grão de PET inicia sua degradação em 368 °C, quando é observada uma mudança significativa em sua massa, atingindo uma perda de 74,19% de sua massa até 445 °C. O fio cru apresentou um comportamento térmico praticamente idêntico, evidenciando características similares em relação à estabilidade térmica e ao perfil de degradação observado. Em 370 °C, inicia sua degradação, perdendo 71,51% de sua massa até 445 °C.

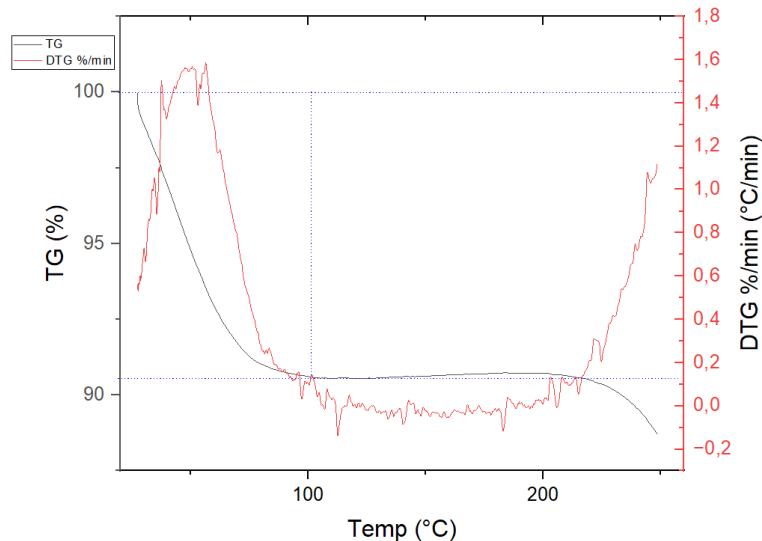
Isso indica que, mesmo após a extrusão, o material preserva sua estabilidade térmica em altas temperaturas e mantém os mesmos estágios de decomposição típicos do PET virgem, comprovando que o processamento na extrusora não resulta em degradação relevante da estrutura polimérica. Esse comportamento está alinhado com o observado por Das e Tiwari (2019) e com os dados encontrados pelo fabricante.

Figura 8 - Análise Termogravimétrica do fio cru e pó residual de PET sobrepostas



Fonte: Própria Autora (2024).

Figura 9 - Análise Termogravimétrica do bagaço de cana-de-açúcar

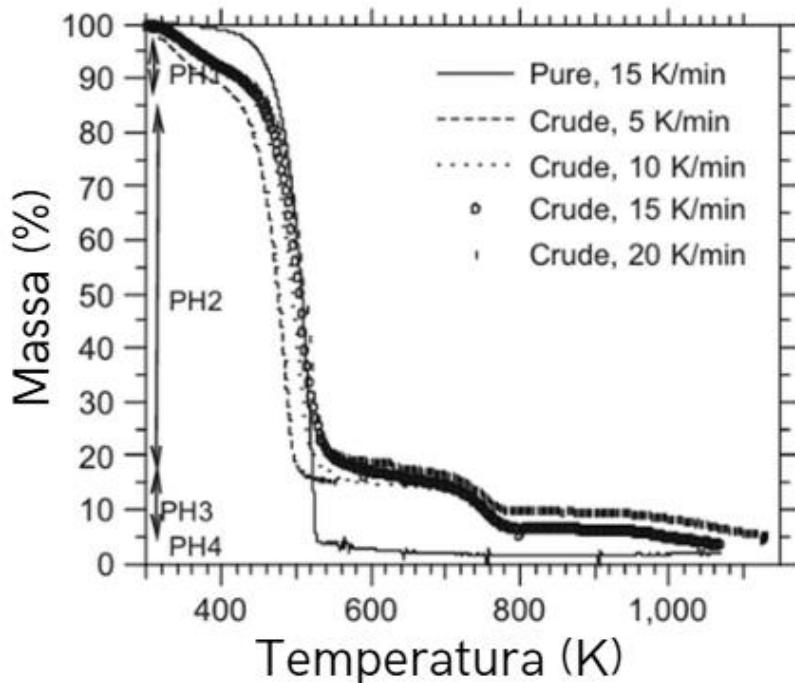


Fonte: Própria Autora (2024).

A análise termogravimétrica revela que, antes de 100°C, o bagaço de cana-de-açúcar sofre uma perda de massa considerável até atingir estabilidade, cerca de 9,4%, relativa à retirada gradual da água residual da biomassa (Santos et al., 2011). A partir de 220°C, observa-se o início da degradação da biomassa, associada à hemicelulose, devido à sua estrutura amorfã e às numerosas ramificações facilmente removíveis da cadeia principal, gerando produtos voláteis como CO e CO<sub>2</sub> (Yang et al., 2007). Essa perda correspondeu a aproximadamente 2% da massa inicial. Segundo a literatura, a celulose possui temperaturas de degradação mais elevadas, acima de 300°C, enquanto a lignina apresenta decomposição em uma faixa mais ampla, de 200°C a 600°C (Yang et al., 2007; Santos et al., 2011; Athira; Bahurudeen; Appari, 2020).

As curvas de TG dos plastificantes foram encontrados na literatura como mostram nas figuras 9 e 10.

Figura 10 – Curva de TG do Glicerol

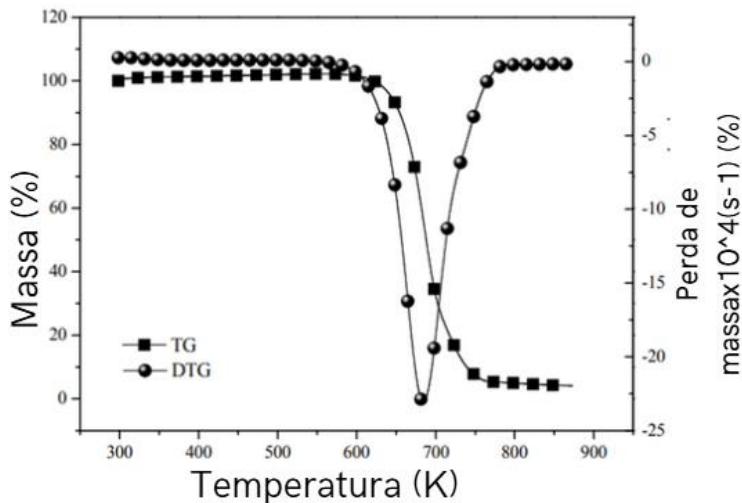


Fonte: Adaptado de Almazrouei, Adeyemi e Janajreh (2022).

A curva de TG do glicerol P.A., mostrada na Figura 10 e adaptada de Dou et al. (2009), apresentou uma etapa principal de degradação térmica, que se inicia em torno de 503,15 K (230°C) e vai até 553,15 K (280°C), representando 95% da perda de massa. Esse comportamento também foi relatado por Almazrouei, Adeyemi e Janajreh (2022), que observaram a faixa de 238–276°C para esse fenômeno.

Essas observações indicam que o glicerol, mesmo estando na faixa de degradação térmica durante a formação do compósito, conseguiu desempenhar seu papel como plastificante e promover a coesão estrutural, resultando em compósitos com propriedades mecânicas adequadas para aplicações práticas.

Figura 11 – Curva de TG do óleo de mamona



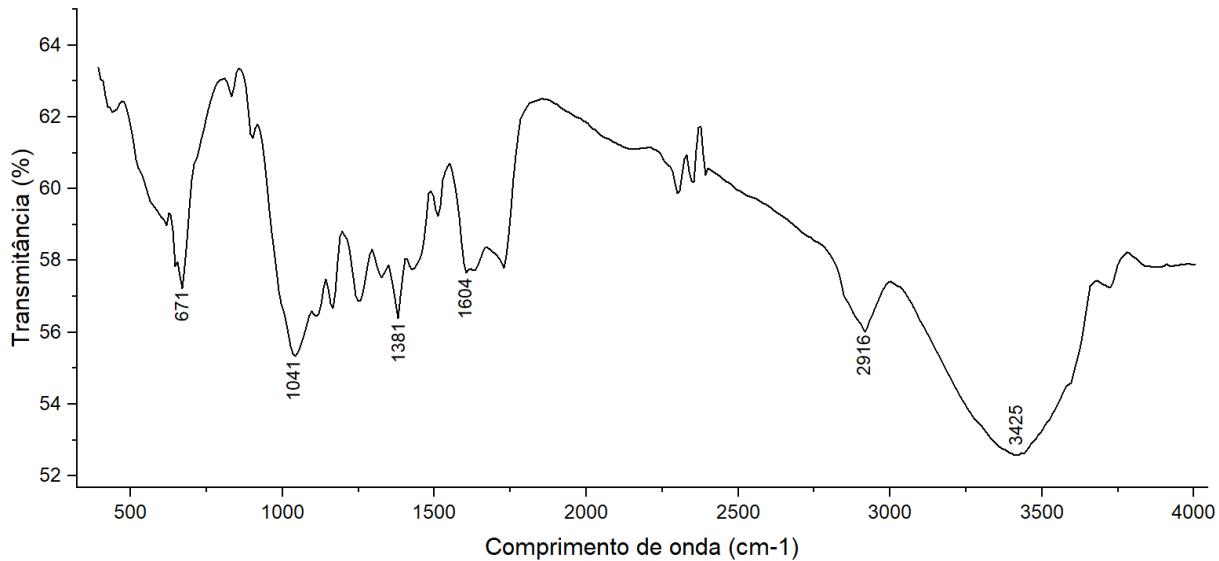
Fonte: Adaptado de Li, Niu e Lu (2017)

Na análise de TG de Li, Niu e Lu (2017), adaptada na Figura 11, o óleo de mamona apresentou uma única etapa principal de perda de massa, ocorrendo entre 621,45 K (348,3°C) e 795,75 K (522,6°C). Esse intervalo representa o processo de cisão molecular das ligações C–C do óleo de mamona. A taxa máxima de perda de massa foi registrada em 411°C. Após essa etapa, a curva de TG torna-se quase constante, indicando que a maioria dos compostos voláteis foi removida.

### 5.1.2 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 12 apresenta o espectro de FTIR do bagaço de cana-de-açúcar, e a Figura 13, o do pó residual do grão de PET, na faixa de 4000–400  $\text{cm}^{-1}$ . Essas figuras complementam a análise de degradação térmica e identificam grupos funcionais dos componentes.

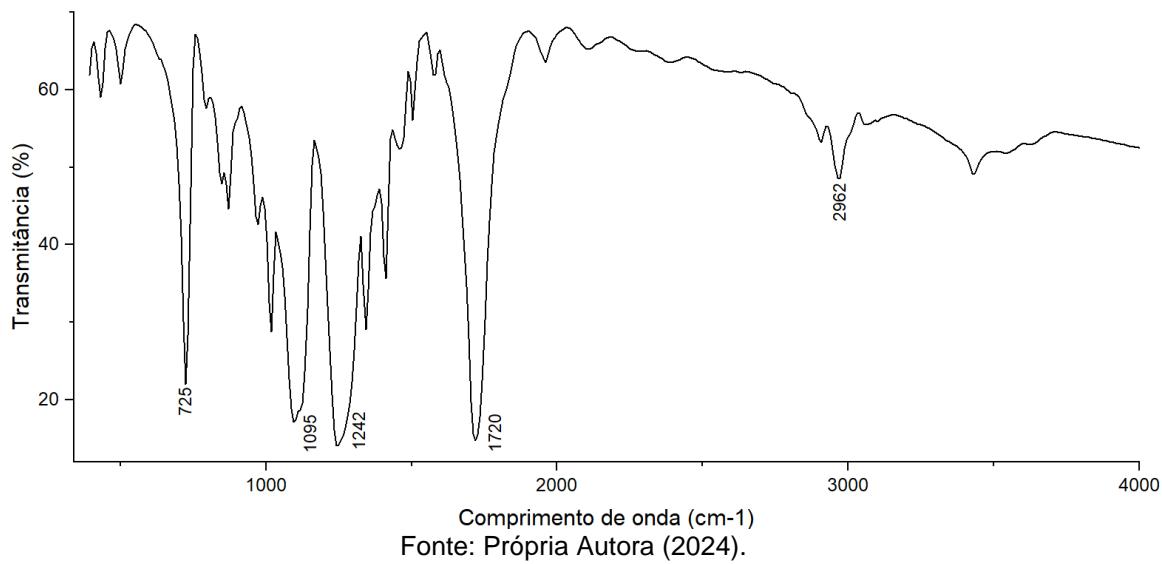
Figura 12 - FTIR do bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Própria Autora (2024).

No espectro FTIR do bagaço de cana-de-açúcar de açúcar in natura, foram observadas bandas de absorção que correspondem aos grupos funcionais dos principais componentes estruturais da biomassa, como celulose, hemicelulose e lignina. No espectro de FTIR do bagaço de cana, a banda em  $671\text{ cm}^{-1}$  é atribuída à vibração angular C-H de anéis aromáticos, característica da lignina. Em  $1041\text{ cm}^{-1}$ , observa-se o estiramento das ligações glicosídicas, relacionada à celulose e hemicelulose. A banda em  $1381\text{ cm}^{-1}$  corresponde à deformação da ligação C-H, associada à lignina. Em  $1604\text{ cm}^{-1}$ , ocorre a deformação da ligação C=C de anéis aromáticos, também atribuída à lignina. Já a banda em  $2916\text{ cm}^{-1}$  indica a deformação da ligação C-H de alcanos ( $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$ ), representando a celulose. Por fim, a banda larga em  $3425\text{ cm}^{-1}$  é característica da vibração da deformação da O-H de álcoois e fenóis, atribuída à celulose. (Silverstein, 2007). Essa análise confirma a presença de grupos hidroxila na fibra, o que é fundamental para a interação com os plastificantes.

Figura 13 - FTIR do pó residual do grão de PET

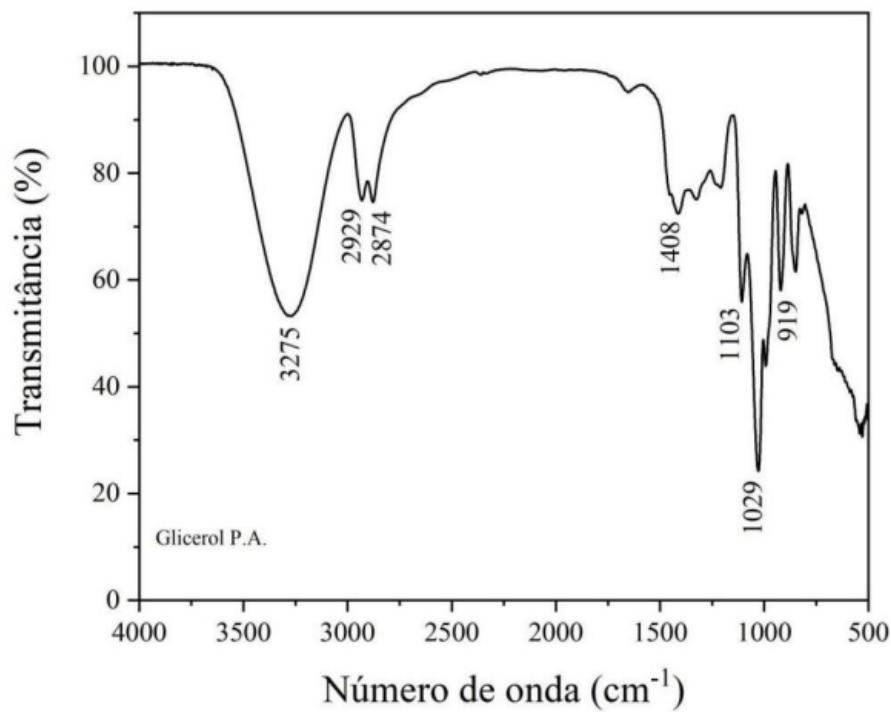


Fonte: Própria Autora (2024).

No espectro de FTIR do pó de grão de PET virgem, diversas bandas de absorção características confirmam a estrutura química do material. A banda em  $2962\text{ cm}^{-1}$  representa o estiramento C-H dos grupos aromáticos e alifáticos, característicos do anel benzênico e das unidades de etileno glicol no PET. A banda em  $1720\text{ cm}^{-1}$  é atribuída ao estiramento da carbonila (C=O) do grupo éster, um marcador importante para a identificação de poliésteres. A absorção em  $1242\text{ cm}^{-1}$  indica o estiramento C-O do grupo éster, enquanto a banda em  $1095\text{ cm}^{-1}$  está associada ao estiramento da ligação O-CH<sub>2</sub>, ambas essenciais para confirmar a presença do éster. Por fim, a banda em  $725\text{ cm}^{-1}$  corresponde à deformação fora do plano da ligação C-H do anel aromático, uma característica distintiva dos polímeros contendo anéis benzênicos. Essas bandas estão de acordo com o encontrado na literatura para PET por Chen, Hay e Jenkins (2012).

Os espectros de FTIR dos plastificantes foram encontrados na literatura como mostram as figuras 14 e 15.

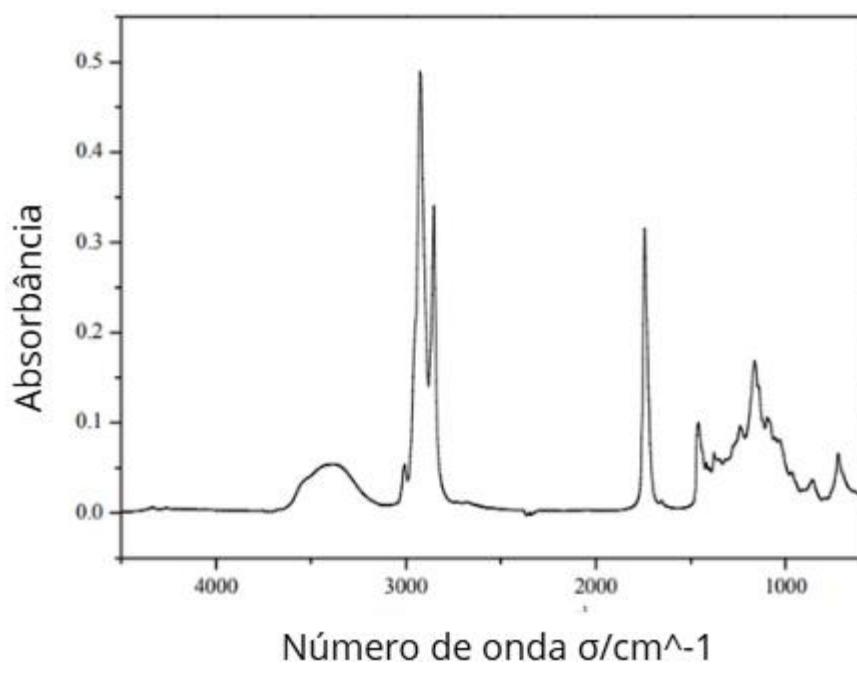
Figura 14 – FTIR do glicerol



Fonte: Custódio *et al.* (2022).

O espectro FTIR na Figura 14, adaptada dos autores Custódio et al. (2022), do glicerol P.A., mostrou bandas de absorção típicas, incluindo uma banda larga em  $3275\text{ cm}^{-1}$ , atribuída ao estiramento O–H de grupos hidroxila. As bandas em  $2929\text{ cm}^{-1}$  e  $2874\text{ cm}^{-1}$  foram associadas ao estiramento das ligações C–H. A absorção em  $1653\text{ cm}^{-1}$  corresponde à deformação angular do grupo –OH, e bandas em  $1103\text{ cm}^{-1}$  e  $1029\text{ cm}^{-1}$  foram atribuídas ao estiramento C–O de álcoois secundários e primários, respectivamente. Essas bandas confirmam a presença e pureza do glicerol em sua forma comercial, com pureza de 99,9%, conforme esperado para glicerol de alta qualidade.

Figura 15 – Espectro do óleo de mamona.



Fonte: Li, Niu e Lu (2017).

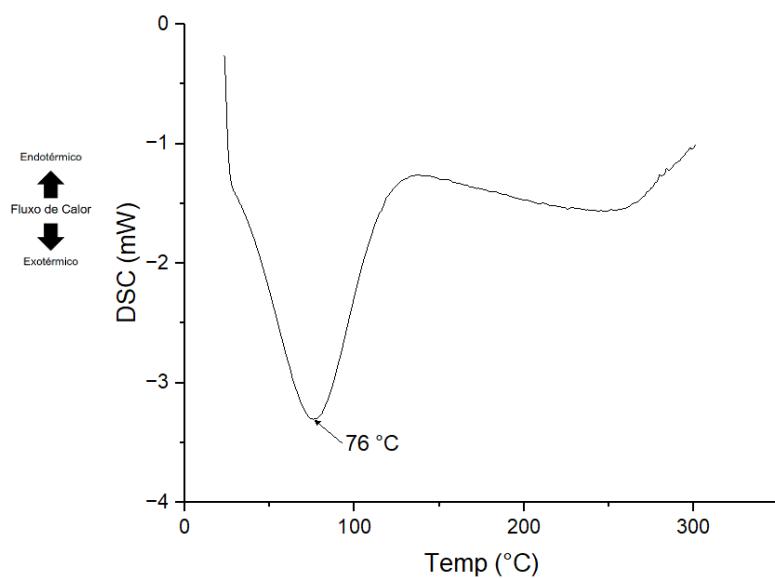
Como mostrado na Figura 15, adaptada dos autores Li, Niu e Lu (2017), as bandas de absorção na ampla região entre  $3676\text{ cm}^{-1}$  e  $3200\text{ cm}^{-1}$  são atribuídas à vibração de estiramento do grupo O–H. A presença do grupo O–H ligado ao óleo de mamona promove a formação de ligações de hidrogênio intermoleculares, o que contribui para o alargamento da banda de estiramento de O–H. Uma banda de estiramento fraca em  $3008\text{ cm}^{-1}$  corresponde à ligação dupla C=C, e duas bandas intensas e características em  $2924\text{ cm}^{-1}$  e  $2854\text{ cm}^{-1}$  são atribuídas ao estiramento simétrico e assimétrico do grupo CH<sub>2</sub>. Uma banda forte e estreita em  $1742\text{ cm}^{-1}$  representa o estiramento C=O de compostos éster, juntamente com as bandas em  $1240\text{ cm}^{-1}$  e  $1162\text{ cm}^{-1}$ , que correspondem ao estiramento C–O do grupo éster.

Ambos os espectros dos plastificantes confirmam a presença de hidroxilas, essencial para a interação com a fibra e sua distribuição na matriz, contribuindo para formação do compósito com propriedades mecânicas otimizadas.

### 5.1.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) foi realizada para investigar as propriedades térmicas dos materiais, permitindo a identificação das transições térmicas dos componentes individuais. A DSC fornece informações sobre a estabilidade térmica e as temperaturas de fusão cristalina. Esses dados são essenciais para avaliar o comportamento térmico dos compósitos em relação ao processamento. Os resultados das análises de DSC são discutidos a seguir, com foco nas transições térmicas.

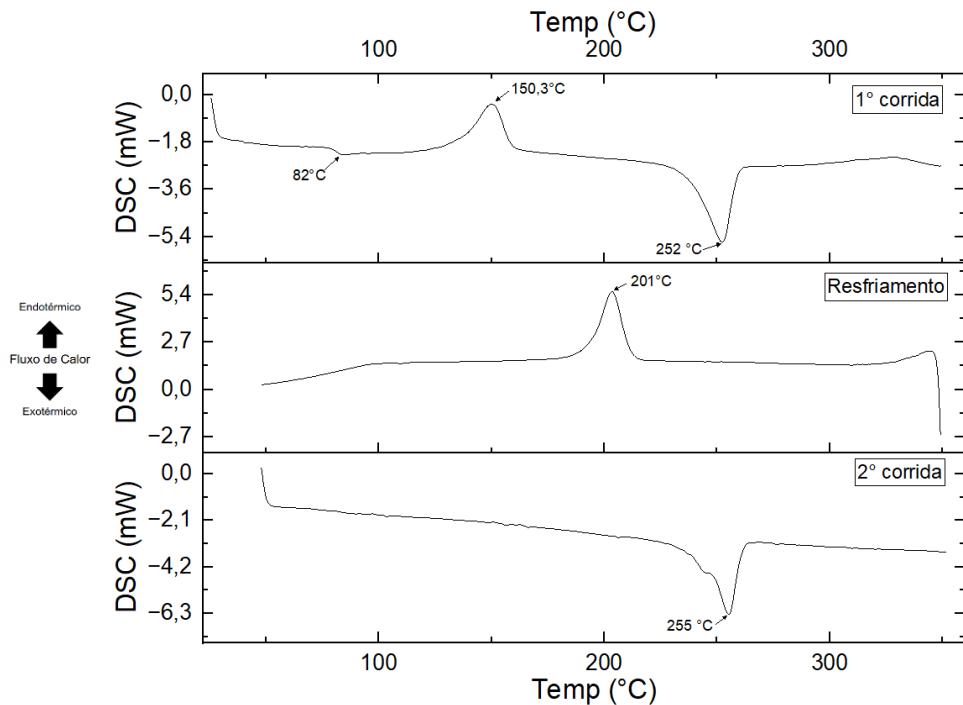
Figura 16 - DSC do bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Própria Autora (2024).

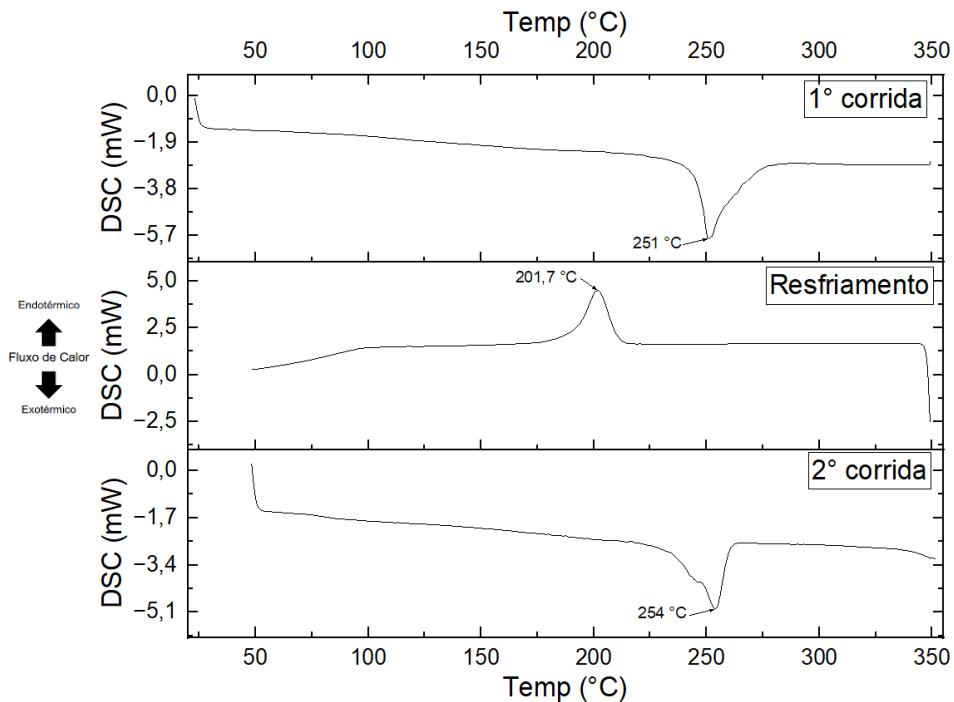
Singha, Rani e Badwaik (2023) encontraram uma análise de DSC do bagaço de cana-de-açúcar semelhante, onde o primeiro pico, até 100°C, é atribuído à evaporação da água. A análise vai até 300°C, onde é possível observar o início de um segundo pico, que é atribuído à decomposição inicial da celulose.

Figura 17 - DSC do fio cru de PET.



Fonte: Própria Autora (2024).

Figura 18 - DSC do resíduo em pó do grão de PET.



Fonte: Própria Autora (2024).

O gráfico de DSC do fio cru (Figura 17) apresenta três curvas correspondentes às etapas de aquecimento, resfriamento e segundo aquecimento do PET. Na primeira corrida, observa-se a transição vítrea ( $T_g$ ) a 82°C, ponto em que o polímero amorfado adquire maior mobilidade. Em seguida, ocorre um pico exotérmico a 150,3°C, relacionado à cristalização a frio, fenômeno observado como um pico exotérmico entre a  $T_g$  e a  $T_m$ , que ocorre quando as moléculas do PET adquirem mobilidade suficiente para se rearranjarem em uma estrutura cristalina (MARIA; RABELLO, 2007). Após essa etapa, observa-se a fusão dos cristais a 252°C ( $T_m$ ), indicada pelo pico endotérmico. Durante o resfriamento, registra-se um pico exotérmico a 201°C, caracterizando a cristalização do material fundido. Na segunda corrida, a fusão ocorre a 255°C ( $T_m$ ), sem a presença de cristalização a frio, evidenciando que o material já se encontrava totalmente cristalizado antes do segundo aquecimento (IBAR, 2012).

Para o pó do grão de PET (Figura 18), temos apenas a temperatura de fusão cristalina ( $T_m$ ), que ocorre a 251°C e 254°C na primeira e segunda corridas, respectivamente, muito semelhante ao fio cru. A cristalização do material que ocorre durante o resfriamento é exibida no pico de 201,7°C, valor bastante próximo ao do fio cru.

As diferenças no comportamento térmico entre o fio cru e o pó do grão de PET estão relacionadas ao histórico de processamento. O fio cru, ao passar pela extrusora, sofre um rápido resfriamento que impede a cristalização completa, resultando em uma fase amorfada, o que explica a presença da cristalização a frio na primeira corrida. Já o grão, sendo virgem, não apresenta essa fase amorfada, pois possui uma estrutura cristalina mais estável. Além disso, na segunda corrida do fio cru, a ausência de cristalização a frio demonstra que o histórico térmico foi eliminado, tornando seu comportamento semelhante ao do grão.

## 5.2 Aspecto físico dos compósitos

As amostras apresentaram variações significativas em sua coesão, com algumas exibindo uma estrutura compacta, rígida e uniforme, enquanto outras mostraram-se mais frágeis, semelhantes ao gesso, quebrando e se desfazendo facilmente. A resistência à tração no ponto de ruptura e a espessura foram analisadas para cada grupo de compósitos.

### 5.2.1 Compósito com pó residual

Os compósitos apresentaram comportamento semelhante em relação ao reforço, independentemente do plastificante utilizado, com ambos promovendo um aumento na coesão do material. Sem a adição de bagaço de cana-de-açúcar, o compósito mostrou-se mais quebradiço, enquanto a incorporação progressiva do reforço resultou em maior coesão.

Tabela 9 - Espessura e resistência à tração ruptura dos compósitos formados usando pó residual de grão.

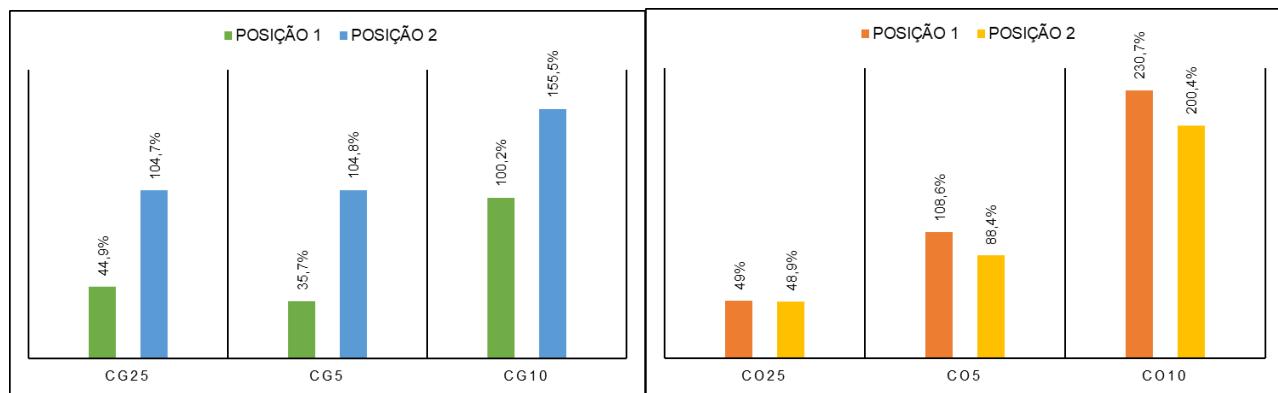
ID	Espessura (mm)	Resistência à tração (N)
CG1	2,195	124,00
CG2	2,221	77,93
CG25_1	2,568	179,64
CG25_2	2,640	159,51
CG5_1	2,802	168,25
CG5_2	2,897	159,63
CG10_1	2,400	248,22
CG10_2	2,569	199,08
CO1	2,793	59,23
CO2	3,057	47,76
CO25_1	2,383	88,52
CO25_2	2,682	71,13
CO5_1	2,505	123,54
CO5_2	2,562	90,00
CO10_1	2,605	195,86
CO10_2	2,640	143,47

Fonte: Própria Autora (2024).

Enquanto o compósito apenas com glicerol (IDs iniciados com “CG”) obteve forças de 124,00 a 77,93 N, os com glicerol e 10% de BG em peso apresentaram aumentos de 100% e de 150% para as posições 1 e 2, respectivamente (248,22 N e 199,08 N). Para os compósitos formados com óleo de mamona, também foi observado um aumento significativo com o acréscimo de 10% de bagaço. O compósito apenas com esse plastificante obteve 59,23 N e 47,76 N, e, após o reforço, aumentou cerca de 231% e 200% nas posições 1 e 2, respectivamente (195,86 N e 143,47 N). A Figura 19 mostra o aumento percentual de cada

amostra por quantidade de reforço e posição. Isso está em concordância com os achados de Arrakhiz *et al.* (2013), Aguiar *et al.* (2022) e Cerqueira, Baptista e Mulinari (2011), que mostraram que uma maior proporção fornece maior resistência à tração no ponto de ruptura do compósito até uma proporção de 20% de bagaço. Esses resultados corroboram os encontrados na literatura. Aguiar *et al.* (2022) também relataram aumento da resistência à tração em compósitos de PET reforçados com bagaço de cana-de-açúcar e glicerol.

Figura 19 - Gráficos demonstrando a tendência da resistência à tração no ponto de ruptura dos compósitos formados com glicerol (a esquerda) e óleo de mamona (a direita), resíduo do grão de PET e reforçados com bagaço de cana-de-açúcar



Nota: À medida que a quantidade de reforço aumenta, em comparação com o compósito formado apenas pelo resíduo em pó e respectivo plastificante.

Fonte: Própria Autora (2024).

Isso pode ser explicado pela estrutura rígida e cristalina da celulose, presente em abundância no bagaço, que atua como um "esqueleto", elevando a performance mecânica do compósito. Quanto maior o teor de celulose e sua cristalinidade, melhor o desempenho mecânico, pois a celulose que compõe as paredes celulares age como um esqueleto, conferindo resistência e estabilidade. A lignina, por sua vez, contribui significativamente para a rigidez do compósito (Mu *et al.*, 2021; Labasan *et al.*, 2015). Diferentemente da celulose, a hemicelulose apresenta uma relação negativa com a resistência mecânica, indicando que seu teor mais baixo tende a melhorar as propriedades do material (Mu *et al.*, 2021). Observando a TG do bagaço na figura 9, verifica-se que houve a degradação da hemicelulose na temperatura de processamento do compósito, o que é vantajoso para as suas propriedades mecânicas.

O glicerol demonstrou agir melhor na coesão do compósito, como demonstrado nas figuras 22 e 23 e na tabela 9. Durante a retirada do material do molde, todos os compósitos com óleo de mamona sofreram quebras em suas extremidades, suas partes mais frágeis. Apenas os que possuíam 10% de reforço se mantiveram mais intactos, provavelmente devido ao aumento de resistência. Já os feitos com glicerol apresentaram maior integridade de maneira geral. Isso pode ser explicado pelo fato de, apesar de o óleo de mamona possuir mais um grupo funcional capaz de promover uma interação mais forte, sua molécula ser muito mais extensa que a do glicerol. Para que um plastificante seja eficiente, ele deve ser capaz de se introduzir e afastar as cadeias poliméricas para garantir uma boa fluidez da matriz e permitir que o bagaço de cana-de-açúcar consiga se difundir entre essas cadeias, garantindo uma dispersão efetiva do reforço. Isso é mais fácil com uma molécula menor, como a do glicerol (Goodwin *et al.*, 2024; Vieira *et al.*, 2011). Além disso, o glicerol possui maior polaridade que as moléculas do óleo de mamona, o que permite uma interação mais eficaz com a celulose presente na biomassa (Labasan *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2014).

Os compósitos formados utilizando glicerol apresentaram coesão estrutural significativa, e alguns demonstraram características de pegajosidade, especialmente no caso do compósito formado com o fio de PET cru. Embora a temperatura de formação do compósito tenha atingido 250 °C, próxima da faixa de degradação térmica do glicerol (230-280 °C), o comportamento final dos compósitos indica que o glicerol não se decompõe inteiramente, permanecendo ativo em parte de suas funções. Essa aparente estabilidade do glicerol pode ser explicada pela interação inicial com os componentes do compósito, como o bagaço de cana-de-açúcar e o PET.

Tabela 10 - Espessura dos compósitos formados com pó residual do grão de PET

ESPESSURA				
GRUPO	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
CG	2,537	0,253	2,195	2,897
CO	2,653	0,203	2,383	3,057

Fonte: Própria Autora (2024).

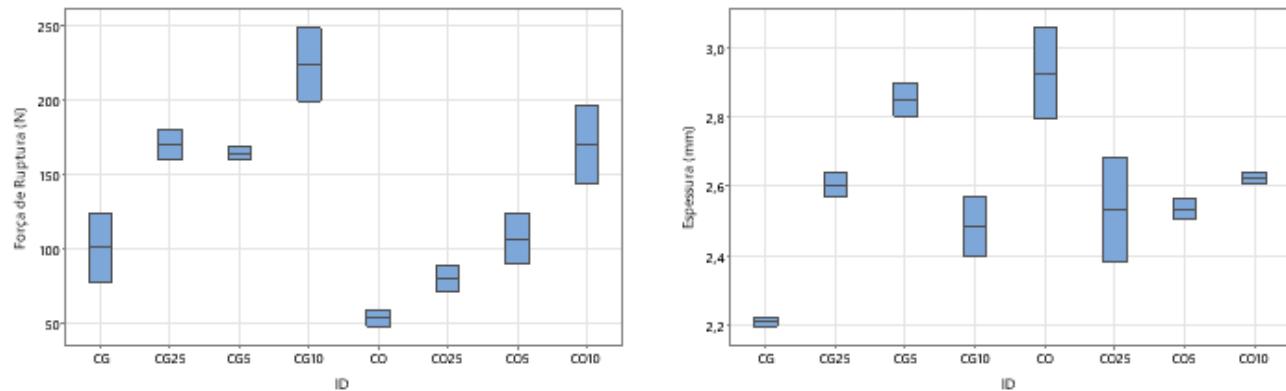
A espessura dos compósitos apresenta uma variação entre 2,195 mm e 2,897 mm para os formados com glicerol e entre 2,383 mm e 3,057 mm para os formados com óleo de

mamona. A tabela 10 mostra que as médias e os desvios dentro das amostras de ambos os grupos foram similares, sendo a média dos compósitos formados com óleo de mamona ligeiramente maior.

Outra tendência observada foi a divergência entre as posições no molde, com a posição 1 apresentando compósitos mais finos em comparação à posição 2 para uma mesma composição, com uma variação média de 5%. Isso pode ser atribuído à distribuição de calor do molde, pois o molde fornecido já não era mais utilizado para análises por estar fora de especificação.

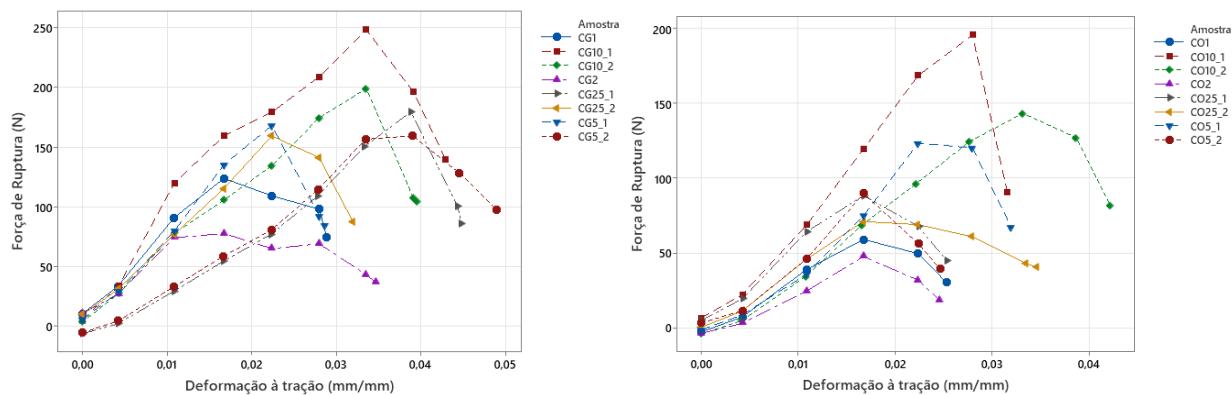
Essa diferença reflete diretamente na força de ruptura, já que as amostras da posição 2, em cada combinação de compósito, mostraram resultados inferiores. Isso sugere que, em algumas regiões da posição 2, o material não atingiu fusão cristalina completa, resultando em um compósito mais espesso e com menor coesão estrutural, o que compromete sua resistência.

Figura 20 - Boxplot para resistência à tração no ponto de ruptura e espessura dos compósitos formados pelo pó residual do grão de PET.



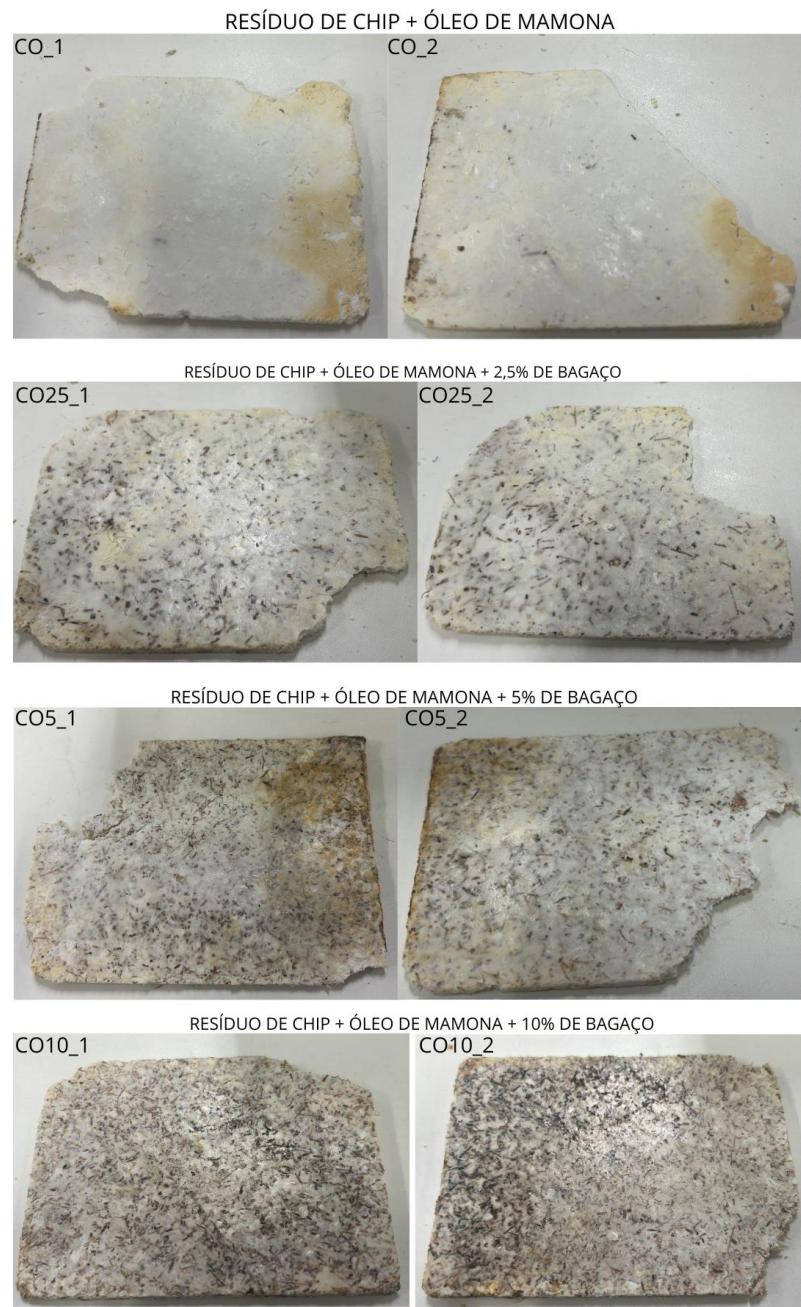
Fonte: Própria Autora (2024).

Figura 21 - Curva da resistência à tração no ponto de ruptura dos compósitos formados pelo pó residual do grão de PET.



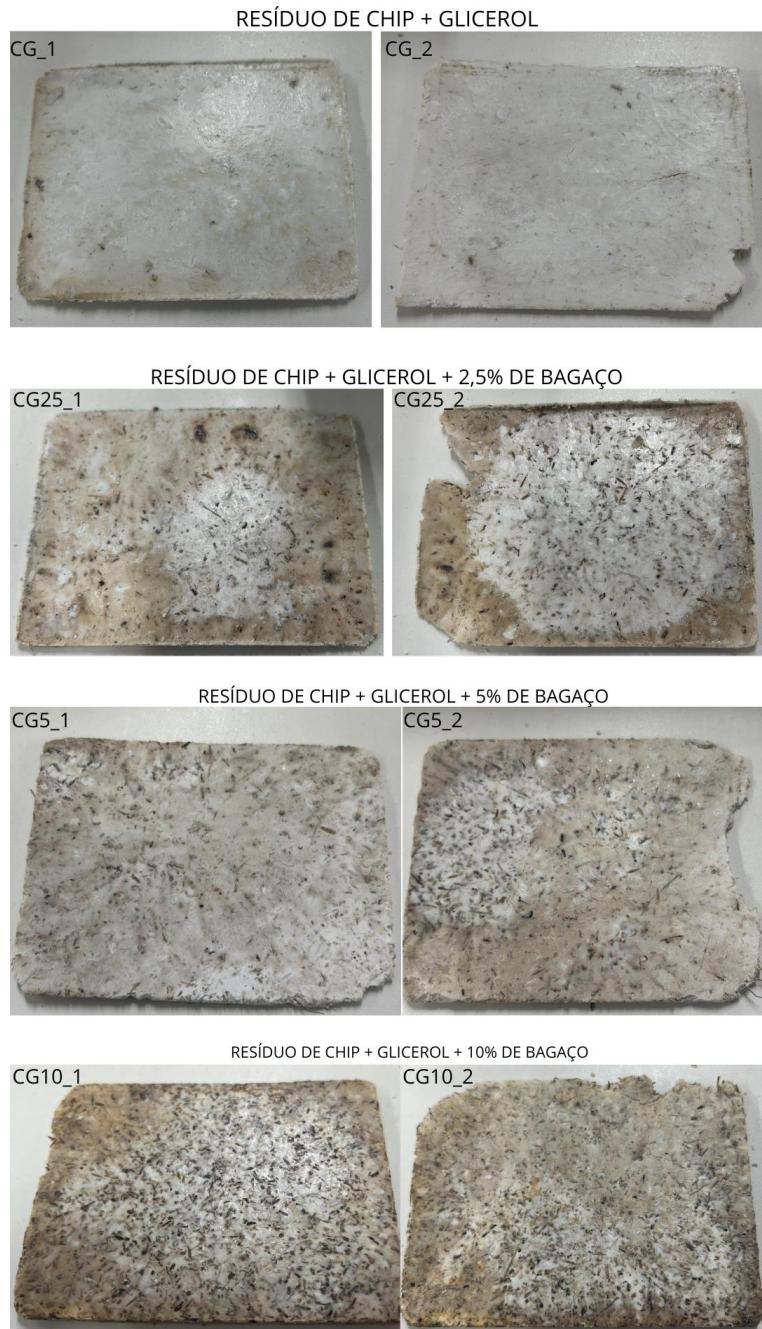
Fonte: Própria Autora (2024).

Figura 22 - Compósitos de pó residual de grão de PET, óleo de mamona e bagaço.



Fonte: Própria Autora (2024).

Figura 23 - Compósitos de pó residual de grão de polietileno com glicerol e bagaço.



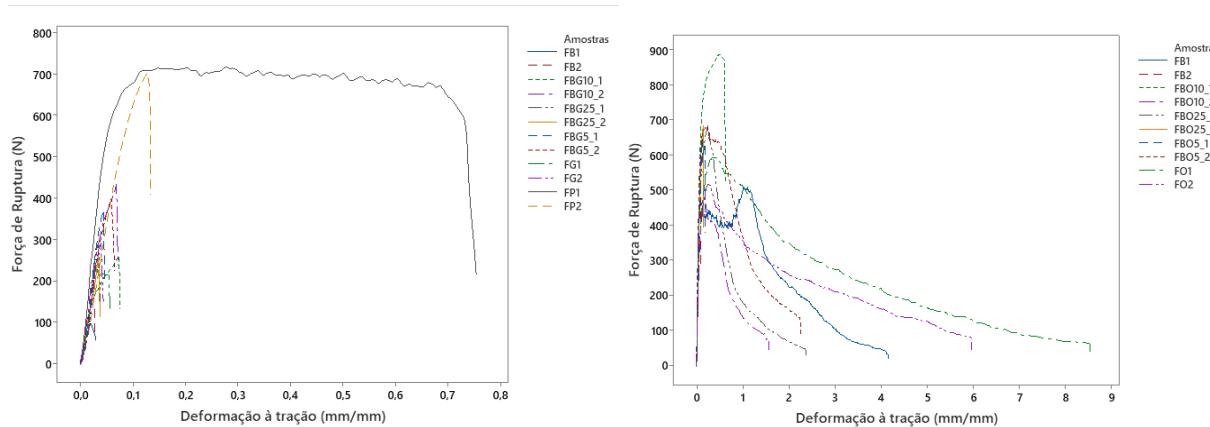
Fonte: Própria Autora (2024).

Não foi possível realizar experimentos sem os plastificantes para os compósitos com matriz de pó fino de PET, pois o PET virgem não atingia o estado viscoelástico, permanecendo em pó mesmo após exposição a temperatura, pressão e tempo na prensa.

### 5.2.2 Compósitos com fio cru

Os compósitos formados a partir de fio cru puderam ser processados em condições mais brandas ( $240^{\circ}\text{C}$ , 10.000 lbs de força e 5 minutos), pois já haviam passado pelo processo de extrusão. Isso significa que o material já foi submetido a aquecimento e pressão, modificando parcialmente sua estrutura interna e permitindo um processamento mais fácil, com menor necessidade de temperatura e pressão em comparação ao grão de PET virgem. No entanto, o fio cru é um material bastante volumoso, o que dificultou sua colocação uniforme no molde, comprometendo a padronização das amostras. Outro problema foi a dispersão do reforço na matriz. Devido à dificuldade de manipulação, o bagaço não se dispersou de forma homogênea, impactando os resultados do compósito. Enquanto 10% de bagaço com pó fino de PET melhoraram a força de ruptura, essa quantidade de reforço foi excessiva para o fio cru. A fibra não se dispersou bem na matriz, concentrando-se na superfície e até se soltando após o compósito ser finalizado.

Figura 24 - Gráficos da resistência à tração dos compósitos de fio cru.



Fonte: Própria Autora (2024).

Embora o compósito formado apenas com fio cru tenha apresentado maior força de ruptura, é importante destacar que ele foi o que menos atingiu o estado viscoelástico. A ausência de plastificante dificultou a dispersão e a fluidez do material, resultando em um derretimento localizado apenas na região central, conforme mostrado na Figura 24. Apenas

o centro sofreu fusão cristalina, enquanto o compósito apresentou uma espessura bem maior que os demais, o que explica a maior resistência à tração no ponto de ruptura, mas sem relação direta com a capacidade de reforço da fibra.

Sem plastificante, a fluidez e homogeneidade do compósito foram comprometidas, pois apenas uma pequena parte conseguiu atingir o estado viscoelástico sob as mesmas condições de temperatura e pressão.

Outro ponto importante é que as amostras de fio cru, reforçadas com bagaço de cana-de-açúcar e sem plastificante, obtiveram valores semelhantes aos compósitos que utilizaram apenas o plastificante. No entanto, essas amostras não foram completamente homogêneas. Durante o teste de resistência à tração no ponto de ruptura, foi possível observar os filamentos do PET intactos, que se alongaram com o esforço aplicado pelo dinamômetro após a quebra inicial.

Isso demonstra que o glicerol foi responsável não apenas por reduzir a temperatura necessária para que o polímero atingisse o estado viscoelástico de forma mais homogênea, mas também por auxiliar na dispersão do reforço na matriz e melhorar a coesão do compósito.

Tabela 11 - Resultados de resistência à tração no ponto de ruptura e espessura para os compósitos formados com fio cru e glicerol.

ID	Espessura (mm)	Resistência à tração no ponto de ruptura (N)
FP1	3,314	716,84
FP2	2,875	702,09
FG1	1,837	243,15
FG2	1,984	290,85
FB1	2,399	292,48
FB2	2,906	264,10
FBG25_1	1,874	372,35
FBG25_2	2,562	399,37
FBG5_1	1,839	260,64
FBG5_2	2,305	432,88
FBG10_1	1,763	98,38
FBG10_2	2,518	203,90

Fonte: Própria Autora (2024).

Tabela 12 - Resultados de resistência à tração no ponto de ruptura e espessura para os compósitos formados com fio cru e óleo de mamona.

ID	Espessura (mm)	Resistência à tração no ponto de ruptura (N)
FO1	2,401	62,48
FO2	2,134	79,08
FB1	2,462	29,53
FB2	3,020	501,98
FBO25_1	2,641	42,20
FBO25_2	2,520	683,93
FBO5_1	2,440	633,99
FBO5_2	2,152	128,80
FBO10_1	1,972	870,75
FBO10_2	2,200	76,61

Fonte: Própria Autora (2024).

Para os compósitos que utilizaram óleo de mamona, a análise foi ainda mais desafiadora. Assim como nos compósitos com pó fino, esse plastificante não garantiu compatibilização e fluidez suficientes, sendo a limitação ainda mais evidente no caso do fio cru. Como observado na Figura 25, durante o teste no dinamômetro, a maioria das amostras exibiu comportamento semelhante ao do material sem plastificante: internamente, os filamentos do polímero permaneceram intactos, resultando em uma leitura de resistência à tração divergente, sem possibilidade de aproveitamento. Superficialmente, o compósito apresentava ter atingido o estado viscoelástico, mas, após o teste, ficou claro que a temperatura não foi suficiente para que o fio cru no interior do compósito alcançasse o mesmo estado da superfície, prejudicando a homogeneidade do material.

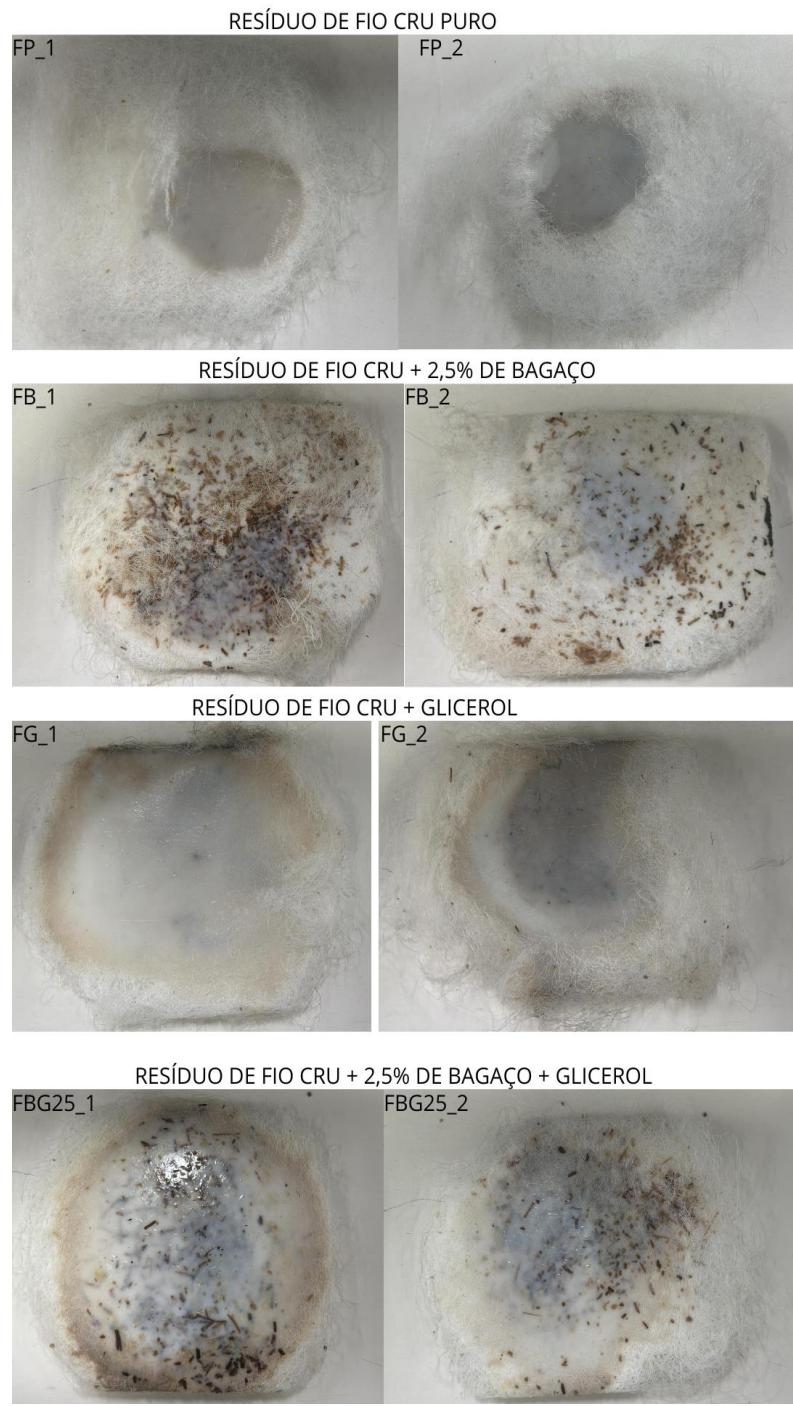
As diferenças entre as forças de ruptura podem ser atribuídas tanto ao tipo de plastificante e à dispersão de calor do molde, como explicado na seção dos compósitos formados pelo pó fino de PET, quanto às características do próprio material. Por ser volumoso, o fio cru dificultou tanto o ajuste no molde quanto a dispersão do reforço na matriz, gerando maior variabilidade nos compósitos.

Figura 25 - Filamentos do fio cru de PET intactos internamente após teste no dinamômetro.



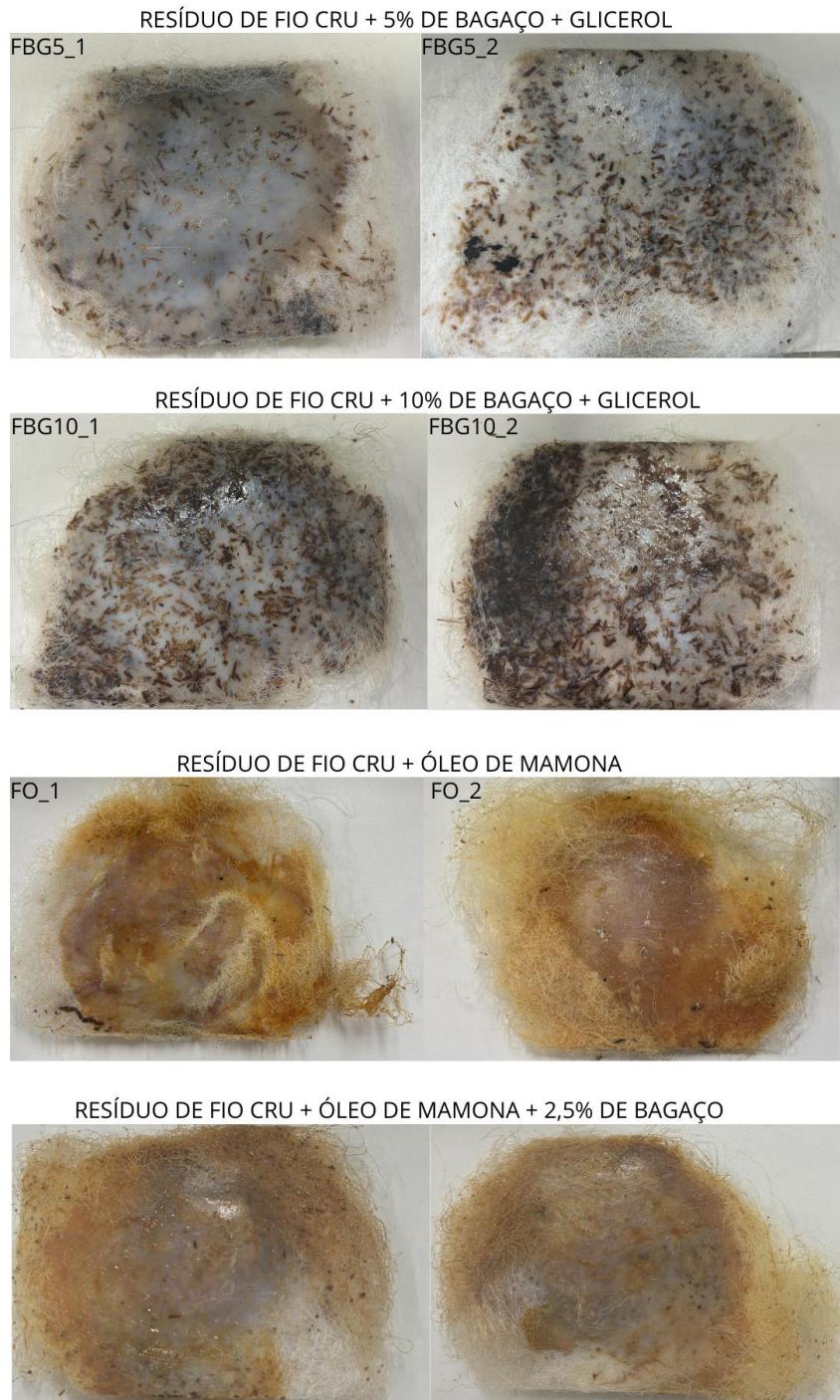
Fonte: Própria Autora (2024).

Figura 26 - Compósitos formados com fio cru, bagaço de cana-de-açúcar e glicerol.



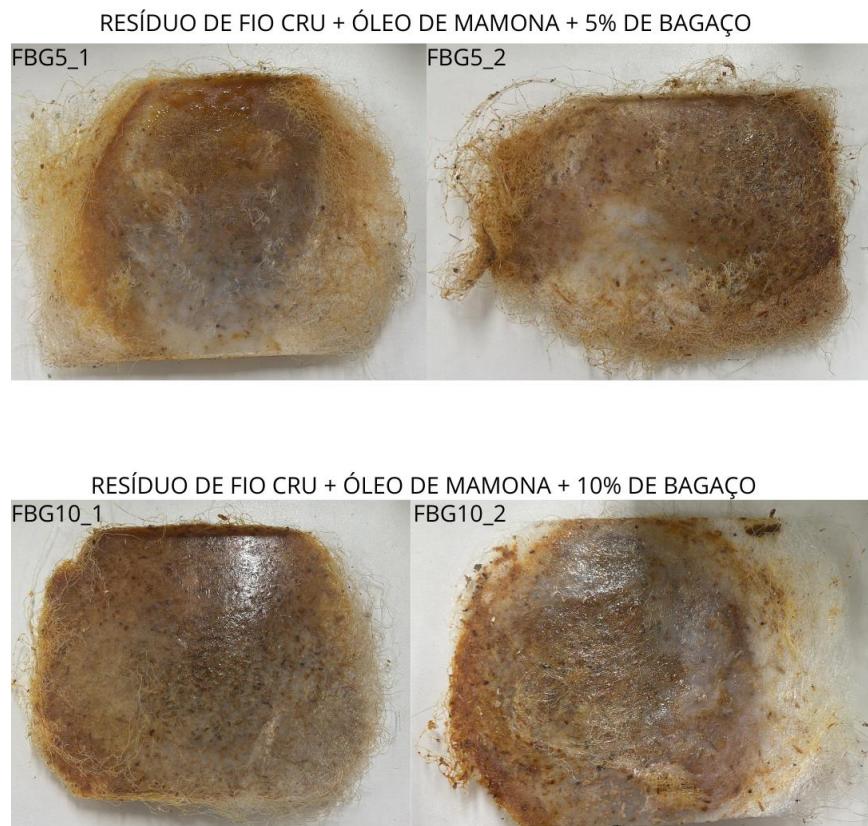
Fonte: Própria Autora (2024)

Figura 27 - Compósitos formados com fio cru, bagaço de cana-de-açúcar, glicerol ou óleo de mamona.



Fonte: Própria Autora (2024).

Figura 28 – Compósitos formados com fio cru, bagaço de cana-de-açúcar e óleo de mamona.



Fonte: Própria Autora (2024).

## 5.3 Aplicações

Entre as combinações analisadas, o glicerol destacou-se como o plastificante mais eficiente, independentemente da matriz utilizada, favorecendo a coesão estrutural dos compósitos. Quanto ao teor de reforço, os resultados variaram de acordo com a matriz polimérica. A matriz de pó fino de PET apresentou melhores propriedades com a adição de 10% de reforço. Já para a matriz de fio cru, os melhores desempenhos foram obtidos com 2,5% ou 5% de reforço.

Os biocompósitos desenvolvidos neste estudo, utilizando resíduos de PET e bagaço de cana-de-açúcar, apresentaram propriedades mecânicas competitivas que destacam seu potencial para uso em reforços e painéis internos. Embora os testes de resistência à tração no ponto de ruptura tenham sido realizados sem moldes normatizados pela ASTM, os

resultados indicam que os compósitos atingiram valores de resistência comparáveis, e em alguns casos superiores, aos observados em materiais convencionais. Comparativamente, a resistência à tração dos painéis de MDF, conforme relatado por Eleotério, Tomazello Filho e Bortoletto Júnior (2000), varia entre 15 e 20 MPa, enquanto Assunção et al. (2024) relataram cerca de 30 MPa para compósitos reforçados com fibra de vidro e poliéster. Os biocompósitos deste estudo alcançaram valores próximos ou superiores a esses intervalos, apresentando-se como uma alternativa sustentável e eficiente para uso em ambientes internos.

Os valores obtidos neste estudo já demonstram o potencial de desempenho dos biocompósitos, reforçando sua adequação como alternativa mais sustentável para diversas aplicações internas.

Tabela 13 - Melhores combinações de biocompósitos.

ID	Resistência à tração no ponto de ruptura (N)	Tensão de Ruptura (Mpa)
CG10_1	248,22	31,03
CG10_2	199,08	24,89
FG1	243,15	30,39
FG2	290,85	36,36
FBG25_1	372,35	46,54
FBG25_2	399,37	49,92

Fonte: Própria Autora (2024).

A inclusão de materiais reciclados e resíduos agroindustriais, como bagaço de cana-de-açúcar e resíduos de PET, contribui para soluções ambientais alternativas, oferecendo uma destinação sustentável para esses resíduos e agregando valor em mercados que demandam soluções ecológicas e promovem a economia circular.

## 6 CONCLUSÃO

Este estudo permitiu a avaliação de biocompósitos obtidos a partir de resíduos de PET e bagaço de cana-de-açúcar com glicerol, buscando alternativas sustentáveis para materiais convencionais. Os testes de resistência à tração no ponto de ruptura mostraram que a proporção entre o bagaço de cana-de-açúcar e o plastificante tem impacto direto na resistência mecânica dos compósitos. A composição ideal de reforço depende da fonte da matriz utilizada: enquanto a maior quantidade de reforço foi benéfica para a matriz em pó fino, a menor quantidade se destacou quando foi utilizado o fio cru, devido à dificuldade de dispersão do reforço nessa matriz.

A pesquisa reforça a viabilidade do reaproveitamento de resíduos industriais, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade e economia circular. Esses resultados abrem caminho para futuros estudos voltados à otimização das propriedades de compósitos sustentáveis, visando atender a requisitos específicos de mercado e contribuir para a mitigação de impactos ambientais.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Os compósitos feitos a partir de glicerol e fio cru apresentaram uma característica pegajosa. Embora a adição de glicerol contribua para a diminuição da temperatura de fusão, a melhoria da coesão estrutural e a dispersão do reforço, essa pegajosidade pode impactar negativamente sua utilização. Portanto, é necessário estudar a quantidade ideal de glicerol a ser empregada.

Embora os testes de resistência à tração no ponto de ruptura dos compósitos não tenham sido realizados com moldes padronizados ASTM, os resultados fornecem uma base inicial para compreender o potencial desses materiais. Comparações diretas com materiais convencionais devem ser interpretadas qualitativamente, considerando que as condições experimentais não seguiram padrões normatizados, o que pode influenciar os valores absolutos. Estudos futuros sobre a resistência à tração no ponto de ruptura e outros testes mecânicos com moldes ASTM são recomendados, a fim de garantir precisão e comparabilidade direta dos resultados com padrões da indústria.

Além disso, é necessária a avaliação de diferentes faixas de temperatura para obter uma melhor compreensão do ponto ideal em que o material atinge o estado viscoelástico de maneira uniforme, tanto na superfície quanto no interior do compósito.

É fundamental melhorar o processo de moldagem, testando condições variadas de temperatura, pressão, tempo de processamento e proporções de reforço e plastificante.

A utilização de diferentes equipamentos também deve ser avaliada, já que extrusoras e moldes distintos podem oferecer melhor controle sobre as variáveis do processo, resultando em avanços significativos na qualidade do compósito.

Por fim, outras propriedades mecânicas, além da força de ruptura, também devem ser analisadas para uma caracterização mais completa do compósito. Como exemplo, o módulo de elasticidade pode fornecer informações relevantes sobre a rigidez do material.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, R. *et al.* Ecofriendly Bio-packing Based on Sugarcane Bagasse Fiber for Potential Application in Agroindustry. **Sustainable Chemical Engineering**, [s. l.], v.3, p. 66–74, jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.37256/sce.3220221370>
- ALENCAR, M. *et al.* Advancing plastic pollution hotspotting at the subnational level: Brazil as a case study in the Global South. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 194, p. 115382, set. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115382>
- ALI, S. *et al.* Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 771, n. 144719, jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144719>
- ALOKIKA *et al.* Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 169, p. 564–582, fev. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.175>
- ALMAZROUEI, Manar; ADEYEMI, Idowu; JANAJREH, Isam. Thermogravimetric assessment of the thermal degradation during combustion of crude and pure glycerol. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 12, p. 4403–4417, 2022.
- ANBUPALANI, M.; VENKATACHALAM, C.; RATHANASAMY, R. Influence of coupling agent on altering the reinforcing efficiency of natural fibre-incorporated polymers – A review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, [s. l.], v. 39, n. 13-14, p. 520–544, 14 abr. 2020. DOI:10.1177/0731684420918937
- ANDREASI, S. *et al.* Environmental and Socioeconomic Impacts of Poly(ethylene terephthalate) (PET) Packaging Management Strategies in the EU. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 56, n. 1, p. 501–511, dez. 2021. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.1c00761>. Acesso em: 6 nov. 2024.
- ANGGONO, J. *et al.* Deformation and failure of sugarcane bagasse reinforced PP. **European Polymer Journal**, [s. l.], v. 112, p. 153–160, mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.12.033>
- ARRAKHIZ, F. *et al.* Tensile, flexural and torsional properties of chemically treated alfa, coir and bagasse reinforced polypropylene. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 47, p. 35–41, abr. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.10.046>
- ASSUNÇÃO, G. *et al.* Mechanical properties of glass-fiber reinforced polyester composites manufactured by two different spray-up techniques. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 3, jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0450>

ATHIRA, G.; BAHURUDEEN, A.; APPARI, S. Thermochemical Conversion of Sugarcane Bagasse: Composition, Reaction Kinetics, and Characterisation of By-Products. **Sugar Tech**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 433–452, ago. 2020. DOI:10.1007/s12355-020-00865-4

BACHTIAR, D.; SAPUAN, S. M.; HAMDAN, M. M. The effect of alkaline treatment on tensile properties of sugar palm fibre reinforced epoxy composites. **Materials & Design**, [s. l.], v. 29, n. 7, p. 1285–1290, jan. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.09.006>

BAO, Z. *et al.* Photothermally promoted cleavage of  $\beta$ -1,4-glycosidic bonds of cellulosic biomass on Ir/HY catalyst under mild conditions. **Applied Catalysis B-Environmental**, [s. l.], v. 237, p. 660–664, dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.06.041>

BARTOS, A. *et al.* Biobased PLA/sugarcane bagasse fiber composites: Effect of fiber characteristics and interfacial adhesion on properties. **Composites Part A-applied Science and Manufacturing**, v. 143, p. 106273–106273, 1 abr. 2021. DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106273

CAMPOS, L. **Novas rotas de pré-tratamento e hidrólise enzimática do bagaço da cana-de-açúcar visando a obtenção de glicose**. 2017. Tese (Doutorado Multicurricular em Engenharia Química) – Universidade Salvador/Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, 2017.

CARVALHO, D. *et al.* Assessment of chemical transformations in eucalyptus, sugarcane bagasse and straw during hydrothermal, dilute acid, and alkaline pretreatments. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 73, p. 118–126, out. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.021>

CASTELVETRO, V. *et al.* Nylon 6 and nylon 6,6 micro- and nanoplastics: A first example of their accurate quantification, along with polyester (PET), in wastewater treatment plant sludges. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 407, p. 124364, abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124364>

CERQUEIRA, E.; BAPTISTA, C.; MULINARI, D. Mechanical behaviour of polypropylene reinforced sugarcane bagasse fibers composites. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 10, p. 2046–2051, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.339>

CHAMAS, A. *et al.* Degradation rates of plastics in the environment. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 9, p. 3494–3511, fev. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>

CHEN, D. *et al.* Insight into biomass pyrolysis mechanism based on cellulose, hemicellulose, and lignin: Evolution of volatiles and kinetics, elucidation of reaction pathways, and characterization of gas, biochar and bio-oil. **Combustion and Flame**, [s. l.], v. 242, n. 112142, p.1-17, ago. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112142>

CHEN, T. *et al.* Interfacial compatibilization via in-situ polymerization of epoxidized soybean oil for bamboo fibers reinforced poly(lactic acid) biocomposites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 138, p. 106066, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106066>

CHEN, Z.; HAY, J.; JENKINS, M. FTIR spectroscopic analysis of poly(ethylene terephthalate) on crystallization. **European Polymer Journal**, [s. l.], v. 48, n. 9, p. 1586–1610, set. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2012.06.006>

CHOLLAKUP, R.; SMITTHIPONG, W.; SUWANRUJI, P. **Environmentally Friendly Coupling Agents for Natural Fibre Composites**. In: JOHN, M. *et al.* Natural Polymers: Volume 1: Composites. Londres: The Royal Society of Chemistry, 31 ago. 2012. p. 161-182. Disponível em: <https://books.rsc.org/books/edited-volume/1923/chapter-abstract/2542566/Environmentally-Friendly-Coupling-Agents-for?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 7 nov. 2024.

CHOW, C.; XING, X.; LI, R. Moisture absorption studies of sisal fibre reinforced polypropylene composites. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 67, n. 2, p. 306–313, fev. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.005>

CHRISTOPH, R. *et al.* Glycerol. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**, 15 abr. 2006. DOI:10.1002/14356007.a12\_477.pub2

COLLARD, F.-X.; BLIN, J. A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 38, p. 594–608, out. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.013>

CUSTÓDIO, A. C.; RIBEIRO, R. P. S.; LIMA, T. B. S. L.; ARAÚJO, E. S.; ARAÚJO, P. L. B. Purificação Simplificada do Rejeito de Glicerina Bruta da Produção de Biodiesel da Biorrefinaria Berso-UFPE: Uma Prática Sustentável. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 05, p. 2226-2237, 2022.

DARIE-NIȚĂ, R. N. *et al.* Evaluation of Natural and Modified Castor Oil Incorporation on the Melt Processing and Physico-Chemical Properties of Polylactic Acid. **Polymers**, [s. l.], v. 14, n. 17, p. 3608, 1 jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14173608>

DAS, P.; TIWARI, P. Thermal degradation study of waste polyethylene terephthalate (PET) under inert and oxidative environments. **Thermochimica Acta**, [s. l.], v. 679, p. 178340, set. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.178340>

DA SILVA, I. *et al.* Impact of Hot Water and Alkaline Pre-treatments in Cellulosic Ethanol Production from Banana Pseudostem. **BioEnergy Research**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 1159–1170, maio 2020. DOI:10.1007/s12155-020-10123-w

DEVADIGA, D. G.; BHAT, K. S.; MAHESHA, G. Sugarcane bagasse fiber reinforced composites: Recent advances and applications. **Cogent Engineering**, v. 7, n. 1, 1 jan. 2020. DOI:10.1080/23311916.2020.1823159

DONKIN, S. Glycerol from biodiesel production: the new corn for dairy cattle. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [s. I.], v. 37, n. spe, p. 280–286, jul. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008001300032>

DOU, Binlin; DUPONT, Valerie; WILLIAMS, Paul T.; CHEN, Haisheng; DING, Yulong. Thermogravimetric kinetics of crude glycerol. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 2613–2620, 2009.

DUNFORD, N. **Food and Industrial Bioproducts and Bioprocessing**. Danvers: John Wiley & Sons, 2012. Disponível em: <https://download.ebookshelf.de/download/0000/5957/49/L-G-0000595749-0002363256.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2024.

ELEOTÉRIO, J.; TOMAZELLO FILHO, M.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes massas específicas e teores de resina. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 75, 30 jun. 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/cZSWdrcPsmgZdqh5jHYHYNc/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 07 nov. 2024.

EMBRAPA. Mamona. **Embrapa**, 2024c. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/mamona/pre-producao/socioeconomia/estatisticas>. Acesso em: 25 jun. 2024.

FAOSTAT. Crops and Livestock Products. **FAO**, 2024c. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 07 nov. 2024.

FARUK, O. *et al.* Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in Polymer Science**, [s. I.], v. 37, n. 11, p. 1552–1596, nov. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>

FIORANELLI, A.; BIZZO, W. Generation of surplus electricity in sugarcane mills from sugarcane bagasse and straw: Challenges, failures and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. I.], v. 186, p. 113647, out. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113647>

GEYER, R.; JAMBECK, J.; LAW, K. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, [s. I.], v. 3, n. 7, 19 jul. 2017. DOI: 10.1126/sciadv.1700782

GODWIN, A. **Plasticizers**. In: KUTZ, M. *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials, and Applications*. [s. I.]: Elsevier eBooks, 2017. p. 533-553.

HAMMANN, F.; SCHMID, M. Determination and Quantification of Molecular Interactions in Protein Films: A Review. **Materials**, [s. I.], v. 7, n. 12, p. 7975–7996, 10 dez. 2014. DOI: 10.3390/ma7127975

HERNÁNDEZ, Z. *et al.* Performance of nylon 6 composites reinforced with modified agave fiber: Structural, morphological, and mechanical features. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. I.], v. 138, n. 34, p. 50857, 12 abr. 2021. DOI:10.1002/app.50857

IBAR, J. Crystallization Kinetics for the Split Dual Phase Model of the Amorphous State of Polymers. **Journal of Macromolecular Science Part B**, [s. l.], v. 52, n. 7, p. 950–963, 8 nov. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/00222348.2012.746571>

IBRAHIM, M. I. J. et al. Preparation and characterization of cornhusk/sugar palm fiber reinforced Cornstarch-based hybrid composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 1, p. 200–211, jan. 2020. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.10.045

ILANIDIS D. et al. Effects of operational conditions on auto-catalyzed and sulfuric-acid-catalyzed hydrothermal pretreatment of sugarcane bagasse at different severity factor. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 159, p. 113077–113077, jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113077>

ILYAS, R.; SAPUAN, S. Biopolymers and Biocomposites: Chemistry and Technology. **Current Analytical Chemistry**, [s. l.], v. 16, n. 5, p. 500–503, 8 jul. 2020. DOI:10.2174/157341101605200603095311

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção de Cana-de-açúcar, Produção Agropecuária. **IBGE**, 2024c. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cana-de-acucar/br>. Acesso em: 07 nov. 2024.

IWANICKI, L.; ZAMBONI, A. **Um Oceano livre de plástico**: desafios para reduzir a poluição marinha no Brasil. Brasília - DF: Oceana Brasil, 2020. ISBN 978-65-992012-4-0

JIA, P. et al. Plasticizers Derived from Biomass Resources: A Short Review. **Polymers**, [s. l.], v. 10, n. 12, p. 1303, 24 nov. 2018. DOI: 10.3390/polym10121303

JOSEPH, T. M. et al. Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 9, p. 100673–100673, 1 fev. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100673>

KARIM, S. et al. Characterization of Glycerol and Aloe Vera as Plasticizer in Polyethylene/Starch-Based Film. **Pertanika Journal of Science and Technology**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 1527–1544, 28 mar. 2022. DOI:10.47836/pjst.30.2.37

KAZA, S. et al. **What a Waste 2.0**: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Word Bank Group: Washington, 2018. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/d3f9d45e-115f-559b-b14f-28552410e90a>. Acesso em: 07 nov. 2024.

KHONGCHAMNAN, P. et al. Optimization of Liquid Hot Water Pretreatment and Fermentation for Ethanol Production from Sugarcane Bagasse Using *Saccharomyces cerevisiae*. **Catalysts**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 463, 21 abr. 2022. DOI:10.3390/catal12050463

KUÉTÉ, M. et al. Eco-Friendly Blends of Recycled PET Copolymers with PLLA and Their Composites with Chopped Flax Fibres. **Polymers**, [s. l.], v. 15, n. 14, p. 3004–3004, 10 jul. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15143004>

KUKREJA, T. *et al.* Effect of the doses and nature of vegetable oil on carbon black/rubber interactions: Studies on castor oil and other vegetable oils. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 87, n. 10, p. 1574–1578, 7 mar. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.11490>

KUMAR, P.; SUGANYA, S. **Introduction to sustainable fibres and textiles.** In: MUTHU, S. Sustainable Fibres and Textiles. [s. l.]: Woodhead, 2017. p. 1–18.

LABASAN, K.; ESPINOSA, A.; ESPAÑA, R. Fabrication and Characterization of Bamboo fiber- Reinforced polyethylene-polystyrene Composites Using Glycerol as Plasticizer. **World Journal of Environmental Research**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 130–150, 12 jan. 2015. DOI:10.18844/wjer.v5i1.97

LI, H.; NIU, S.; LU, C. Pyrolysis Characteristics of Castor Oil through Thermogravimetric Coupled with Fourier Transform Infrared Spectroscopy. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 205, p. 3705-3710, 2017.

MACLEOD, M. *et al.* The Global Threat from Plastic Pollution. **Science**, v. 373, n. 6550, p. 61–65, 1 jul. 2021.

MAHMUD, MD. A.; ANANNYA, F. Sugarcane bagasse - A source of cellulosic fiber for diverse applications. **Heliyon**, [s. l.], v. 7, n. 8, p. e07771, ago. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07771>

MAHMUD, S. *et al.* Comprehensive review on plant fiber-reinforced polymeric biocomposites. **Journal of Materials Science**, [s.l.], v. 56, n. 12, p. 7231–7264, 25 jan. 2021. DOI:10.1007/s10853-021-05774-9

MANU, T. *et al.* Biocomposites: A review of materials and perception. **Materials Today Communications**, [s. l.], v. 31, p. 103308, jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103308>

MARIA, R.; RABELLO, M. S. Redução da velocidade de cristalização a frio do PET na presença de poliestireno. **Polímeros-ciencia E Tecnologia**, v. 17, n. 2, p. 113–122, 1 jun. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282007000200010>

MATTOX, D. **Film Characterization and Some Basic Film Properties.** In: MATTOX, D. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (Second Edition). [s. l.], Elsevier: 2010. p. 399–438.

MECOZZI, M.; NISINI, L. The differentiation of biodegradable and non-biodegradable polyethylene terephthalate (PET) samples by FTIR spectroscopy: A potential support for the structural differentiation of PET in environmental analysis. **Infrared Physics & Technology**, [s. l.], v. 101, p. 119-126, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.06.008>

MOKHENA, T. *et al.* **Sugarcane Bagasse and Cellulose Polymer Composites.** In: DE OLIVEIRA, A. Sugarcane - Technology and Research. [s. l.]: InTechOpen: 2018. p.225-240.

MOURA, C. *et al.* New biodegradable composites from starch and fibers of the babassu coconut. **Polímeros**, [s. l.], v. 31, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.09519>

MOORTHY, A. *et al.* Enhancement of biodegradability and tensile characteristics of composite plastic film with spirulina algal biomass. **IOP conference series**, v. 476, p. 012139–012139, jun. 2020. DOI:10.1088/1755-1315/476/1/012139

MU, B. *et al.* Comparative study of high-density polyethylene-based biocomposites reinforced with various agricultural residue fibers. **Industrial Crops and Products**, v. 172, p. 114053–114053, 1 nov. 2021. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.114053

MULINARI, D. *et al.* Sugarcane bagasse cellulose/HDPE composites obtained by extrusion. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 69, n. 2, p. 214–219, fev. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.10.006>

MUTLU, H.; MEIER, M. Castor oil as a renewable resource for the chemical industry. **European Journal of Lipid Science and Technology**, [s. l.], v. 112, n. 1, p. 10–30, jan. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/ejlt.200900138>

ORTEGA-TORO, R.; LÓPEZ-CÓRDOBA, A.; AVALOS-BELMONTES, F. Epoxidised sesame oil as a biobased coupling agent and plasticiser in polylactic acid/thermoplastic yam starch blends. **Helijon**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. e06176, fev. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06176>

PAL, T. *et al.* **Fly ash-reinforced polypropylene composites.** In: KAMAR, K. Handbook of Fly Ash. [s. l.]: Butterworth-Heinemann, 2022. p. 243–270.

PANYASART, K. *et al.* Effect of Surface Treatment on the Properties of Pineapple Leaf Fibers Reinforced Polyamide 6 Composites. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 56, p. 406–413, 2014. DOI:10.1016/j.egypro.2014.07.173

PATEL, V. *et al.* Castor Oil: Properties, Uses, and Optimization of Processing Parameters in Commercial Production. **Lipid Insights**, [s. l.], v. 9, jan. 2016. DOI: 10.4137/LPI.S40233

PETERSEN, J. *et al.* Evaluation of retail fresh meat packagings covered with stretch films of plasticized PVC and non-PVC alternatives. **Packaging Technology and Science**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 53–66, mar. 2004. DOI:10.1002/pts.639

PETROUDY, S. R. Physical and mechanical properties of natural fibers. **Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction**, [s. l.], [s. v.], p. 59–83, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00003-0>

POLETTO, M. Maleated soybean oil as coupling agent in recycled polypropylene/wood flour composites: Mechanical, thermal, and morphological properties. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, [s. l.], v. 32, n. 8, p. 1056–1067, 2 jul. 2018. DOI:10.1177/0892705718785707

PUBCHEM. Castor oil. NIH, 2024c. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Castor-oil>. Acesso em: 7 nov. 2024.

RAJU, P.; V. NANDANAN; KUTTY, N. A Study on the Use of Castor Oil as Plasticizer in Natural Rubber Compounds. **Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology**, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 169–180, ago. 2007. DOI:10.1177/147776060702300302

RAMACHANDRAN, A. et al. Modification of Fibers and Matrices in Natural Fiber Reinforced Polymer Composites: A Comprehensive Review. **Macromolecular Rapid Communications**, [s. l.], v.43, issue 17, sep. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/marc.202100862>

RAMLEE, N. et al. Tensile, physical and morphological properties of oil palm empty fruit bunch/sugarcane bagasse fibre reinforced phenolic hybrid composites. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 3466–3474, jul. 2019. DOI:10.1016/j.jmrt.2019.06.016

REN, X.; LI, K. Investigation of vegetable-oil-based coupling agents for kenaf-fiber-reinforced unsaturated polyester composites. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 128, n. 2, p. 1101–1109, 25 jul. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.38303>

RÉQUILÉ, S. et al. Deeper insights into the moisture-induced hygroscopic and mechanical properties of hemp reinforced biocomposites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 123, p. 278–285, ago. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.05.006>

RIBEIRO, G. et al. Low-density polyethylene/sugarcane fiber composites from recycled polymer and treated fiber by steam explosion. **Journal of Natural Fibers**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 13–24, 31 out. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1379044>

ROCHA, G. et al. Effect of Xylan and Lignin Removal by Hydrothermal Pretreatment on Enzymatic Conversion of Sugarcane Bagasse Cellulose for Second Generation Ethanol Production. **Sugar Tech**, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 390–398, 9 jun. 2013. DOI: DOI:10.1007/s12355-013-0218-9

RODRIGUES, E.; MAIA, T.; MULINARI, D. Tensile strength of polyester resin reinforced sugarcane bagasse fibers modified by esterification. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 10, p. 2348–2352, 2011. DOI:10.1016/j.proeng.2011.04.387

SANTOS, M. et al. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. **Química Nova**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 507–511, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000300024>

SANTOS, R. *et al.* Processing and thermal properties of composites based on recycled PET, sisal fibers, and renewable plasticizers. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 131, n. 12, 23 jan. 2014. DOI: 10.1002/APP.40386

SATAPATHY, S. *et al.* Mechanical Properties and Fracture Behavior of Short PET Fiber-Waste Polyethylene Composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, [s. l.], v. 27, n. 9, p. 967–984, 31 jan. 2008. DOI:10.1177/0731684407086626

SENTHIL KUMAR, P.; SUGANYA, S. **Introduction to sustainable fibres and textiles. Sustainable Fibres and Textiles**, p. 1–18, 2017. DOI: 10.1016/B978-0-08-102041-8.00001-9

SILVA, A.; VON ADAMEK, D. Gestão de resíduos sólidos e os impactos da poluição plástica na economia, na sociedade e no meio ambiente. **Revista Parlamento e Cidadania**, Brasília, v. 1, 2024.

SINGH, A.; BEDI, R.; KAITH, B. Composite materials based on recycled polyethylene terephthalate and their properties – A comprehensive review. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 219, n. 2, apr. 2021. DOI:10.1016/j.compositesb.2021.108928

SINGHA, P.; RANI, R.; BADWAIK, L. Influence of sugarcane bagasse fibre on the properties of sweet lime peel- and polyvinyl alcohol-based biodegradable films. **Sustainable Food Technology**, [s. l.], v. 1, n. 4, p. 610–620, jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3FB00052D>

SILVERSTEIN, R.; WEBSTER, F.; KIEMELE, O. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**. 7 ed. Livros Técnicos e Científicos (LTC): Rio de Janeiro, 2007.

SNOWDON, M. *et al.* Mechanical optimization of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate) biocomposites with sustainable biocarbon through a factorial design. **Results in materials**, [s. l.], v. 5, p. 100060–100060, mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rima.2020.100060>

SUCHAIYA, V.; SANGMANEE, K. Preparation of Biocomposite from Recycled PET Bottles and Starch Reinforced with Biochar from Durian Peels. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**, [s. l.], v. 13, n. 3, set./dez. 2020.

SUN, D. *et al.* Effects of hydrothermal pretreatment on the dissolution and structural evolution of hemicelluloses and lignin: A review. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 281, p. 119050, abr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.119050>

TAN, H. W.; ABDUL AZIZ, A. R.; AROUA, M. K. Glycerol production and its applications as a raw material: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 118–127, 1 nov. 2013. DOI:10.1016/j.rser.2013.06.035

VAIDYA, A.; PATHAK, K. **Mechanical stability of dental materials**. In: ASIRI, A.; MOHAMMAD, A. Applications of Nanocomposite Materials in Dentistry. [s. l.]: Woodhead, 2018. p. 285–305.

VIEIRA, M. *et al.* Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review. **European Polymer Journal**, [s. l.], v. 47, n. 3, p. 254–263, mar. 2011. DOI:10.1016/j.eurpolymj.2010.12.011

WANG, C.; MEI, J.; ZHANG, L. High-added-value biomass-derived composites by chemically coupling post-consumer plastics with agricultural and forestry wastes. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 284, p. 124768–124768, fev. 2021. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.124768

WANG, Z. *et al.* Fermentation of undetoxified sugarcane bagasse hydrolyzates using a two stage hydrothermal and mechanical refining pretreatment. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 261, p. 313–321, ago. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.018>

XIE, Y. *et al.* Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 41, n. 7, p. 806–819, jul. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.03.005>

XU, A. *et al.* A Clean and Sustainable Cellulose-Based Composite Film Reinforced with Waste Plastic Polyethylene Terephthalate. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s. l.], p. 1–7, 18 jul. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/7323521>

YANG, H. *et al.* Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, [s. l.], v. 86, n. 12-13, p. 1781–1788, ago. 2007. DOI:10.1016/j.fuel.2006.12.013

YANG, H.-S. *et al.* Rice-husk flour filled polypropylene composites; mechanical and morphological study. **Composite Structures**, [s. l.], v. 63, n. 3, p. 305–312, fev. 2004. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00179-X](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00179-X)

YAO, F. *et al.* Rice straw fiber-reinforced high-density polyethylene composite: Effect of fiber type and loading. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 63–72, jul. 2008. DOI: 10.1016/j.indcrop.2008.01.007

ZAFEER, M. K. *et al.* Mechanical Characteristics of Sugarcane Bagasse Fibre Reinforced Polymer Composites: A Review. **Cogent Engineering**, v. 10, n. 1, 18 maio 2023. DOI: 10.1080/23311916.2023.2200903

ŽAGAR, E. *et al.* Quantitative Determination of PA6 and/or PA66 Content in Polyamide-Containing Wastes. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 31, p. 11818–11826, 14 jul. 2020. DOI:10.1021/acssuschemeng.0c04190

ZEENAT *et al.* Plastics degradation by microbes: A sustainable approach. **Journal of King Saud University - Science**, [s. l.], v. 33, n. 6, p. 101538, set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101538>

ZHANG, K. *et al.* Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 274, p. 116554, abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116554>

ŻOŁEK-TRYZNOWSKA, Z.; CICHY, Ł. Glycerol derivatives as a modern plasticizers for starch films. *In: 9th International Symposium on Graphic Engineering and Design, Proceedings [...]*. Novi Sad, nov. 2018. DOI: 10.24867/GRID-2018-p27.