INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTUTA E TERRITÓRIO(ILATIT)

ENGENHARIA DE MATERIAIS

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO DE POLIPROPILENO RECICLADO REFORÇADO COM FIBRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR

GIANLUCA FRANCISCO PRESOTTO

Foz do Iguaçu

2025

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTUTA E TERRITÓRIO(ILATIT)

ENGENHARIA DE MATERIAIS

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO DE POLIPROPILENO RECICLADO REFORÇADO COM FIBRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR

GIANLUCA FRANCISCO PRESOTTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof.ª Dra. Priscila Lemes

Foz do Iguaçu
2025

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO DE POLIPROPILENO RECICLADO REFORÇADO COM FIBRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

gov.br Documento assinado digitalmente
PRISCILA LEMES
Data: 29/08/2025 11:11:24-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Orientador: Profa. Dra. Priscila Lemes
UNILA

gov.br Documento assinado digitalmente
LILIANE CRISTINA BATTIROLA
Data: 29/08/2025 11:45:28-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Profa. Dra. Liliane Cristina Battirola
UNILA

gov.br Documento assinado digitalmente
GISLAINE BEZERRA PINTO FERREIRA
Data: 29/08/2025 12:46:56-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Profa. Dra. Gislaine Bezerra Pinto Ferreira
UNILA

Foz do Iguaçu, ____ de _____ de _____.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a):Gianluca Francisco Presotto

Curso: Engenharia de materiais

Tipo de Documento

(X) graduação ( ) artigo

( ) especialização (X) trabalho de conclusão de curso

( ) mestrado ( ) monografia

( ) doutoradooutorado ( ) dissertação tese

(…..) CD/DVD – obras audiovisuais

(…..)

Título do trabalho acadêmico: **OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO DE POLIPROPILENO RECICLADO REFORÇADO COM FIBRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Nome do orientador(a): Profa. Dra. Priscila Lemes

Data da Defesa: 07 / 08 / 2025

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons* **Licença 3.0 Unported.**

Foz do Iguaçu, 07 de Agosto de 2025.

Assinatura do Responsável

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Dedico este trabalho a Ângelo Francisco Ribeiro.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha querida mãe, por todo o amor, carinho, compreensão e ensinamentos que me deu durante a vida. Agradeço também ao meu pequeno e amado irmão que ressignificou minha vida e me ensinou enxergar o mundo de forma diferente, ao meu padrasto pelo apoio e confiança durante todos os desafios enfrentados em nossa jornada e aos meus sogros por todo o carinho e acolhimento que me deram.

À minha orientadora, Priscila Lemes, pelo apoio e incentivo durante toda a gradução e especialmente durante esse trabalho, sua contribuição foi fundamental para o meu desenvolvimento como aluno. Tenho admiração pela Professora e pessoa que é, por sua forma de ser dedicada, comprometida e divertida.

Aos meus amigos, que me ajudaram em todos os momentos da graduação, especialmente ao Rafael Tashiro, meu primeiro e grande amigo na graduação, compartilhar os estudos, trabalhos, dificuldades, risadas e boas conversas com você tornou o caminho muito melhor.

A todos os profissionais que me auxiliaram durante o desenvolvimento do trabalho, os técnicos da UNILA Paula Regina, Fabrício Vilela e Sandy González, William do Labmaker Iguaçu e Regi do Instituto Federal do Paraná. Também a Adriel Thomas por toda a juda com as análises.

E por último a minha namorada, por estar ao meu lado em todos o momento dessa trajetória, sou muito grato por compartilhar a vida com você.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

“Apesar de conhecer a jornada e onde ela termina… eu a acolho. E saúdo cada momento dela.”

Louise Banks, em “A Chegada”.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

RESUMO

O debate sobre uso de materiais poliméricos e as implicações negativas de seu descarte inadequado tem se intensificado na última década, pesquisadores de diversos países buscam alternativas para mitigar seus danos no meio ambiente. A reciclagem pode atenuar o efeito dos descartes de materiais plásticos, tida como um processo de baixo custo e facilmente aplicável, se mostra eficaz para diminuir a. Alinhado com a sustentabilidade, as fibras naturais se mostram materiais promissores, seu baixo custo e boas propriedades motivam estudos para sua utilização combinada com matrizes poliméricas em materiais compósitos. O presente trabalho teve como objetivo principal a produção e caracterização de compósitos de polipropileno (PP) reciclado reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar, avaliando-se a eficiência de tratamentos químicos superficiais aplicados às fibras para otimizar a compatibilidade com a matriz polimérica. As fibras foram submetidas a processos de secagem, moagem, peneiramento e tratamentos químicos sequenciais de mercerizarão com solução alcalina e acetilação utilizando ácido acético e anidrido acético. Os compósitos foram preparados com fibras tratadas e não tratadas em concentrações de 5%, 10% e 15% através de mistura em moinho gira-jarro. O processamento se deu por moldagem por injeção em molde com dimensões especificas para ensaios mecânicos. As caracterizações realizadas incluíram análise termogravimétrica (TGA/DTG), calorimetria exploratória diferencial, espectroscopia no infravermelho (FTIR), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ensaios mecânicos de tração. Os resultados demonstraram que os tratamentos químicos foram eficazes em modificar as propriedades superficiais das fibras, conforme evidenciado pela maior estabilidade térmica, modificação das bandas no infravermelho, além de modificações na superfície das fibras visíveis no MEV. As análises morfológicas dos compósitos revelaram melhor adesão matriz-fibra nos materiais com fibras tratadas, com redução significativa dos espaços vazios na interface. Os ensaios mecânicos revelaram que os compósitos formados com as fibras tratadas apresentaram limite de resistência a tração ligeiramente maior do que aqueles com fibras não tratadas, de 19,4 MPa e 17,1 MPa, indicando viabilidade para aplicações de média exigência mecânica. As análises térmicas dos compósitos evidenciaram a manutenção das propriedades térmicas do PP com a adição de fibras tratadas. O trabalho demonstra uma rota promissora para agregar valor ao bagaço de cana-de-açúcar e reduzir passivos plásticos, contribuindo para princípios de economia circular e sustentabilidade ambiental.

Palavras chave: polipropileno, bagaço de cana-de-açúcar, compósitos, tratamento.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

RESUMEN

El debate sobre el uso de materiales poliméricos y las implicaciones negativas de su disposición inadecuada se ha intensificado en la última década, y los investigadores de diversos países buscan alternativas para mitigar sus daños en el medio ambiente. El reciclaje, considerado un proceso de bajo costo y de fácil aplicación, puede atenuar los efectos de los desechos plásticos y ha demostrado ser eficaz para reducirlos. En sintonía con la sostenibilidad, las fibras naturales se presentan como materiales prometedores; su bajo costo y buenas propiedades motivan estudios para su utilización en combinación con matrices poliméricas en materiales compuestos. El presente trabajo tuvo como objetivo principal la producción y caracterización de compuestos de polipropileno (PP) reciclado reforzados con fibras de bagazo de caña de azúcar, evaluando la eficacia de tratamientos químicos superficiales aplicados a las fibras para optimizar la compatibilidad con la matriz polimérica. Las fibras fueron sometidas a procesos de secado, molienda, tamizado y tratamientos químicos secuenciales de mercerización con solución alcalina y acetilación utilizando ácido acético y anhídrido acético. Los compuestos fueron preparados con fibras tratadas y no tratadas en concentraciones de 5%, 10% y 15% mediante mezcla en un molino de jarra rotativa. El procesamiento se realizó por moldeo por inyección en un molde con dimensiones específicas para ensayos mecánicosLas caracterizaciones realizadas incluyeron análisis termogravimétrico (TGA/DTG), calorimetría exploratoria diferencial (DSC), espectroscopía infrarroja (FTIR), microscopía electrónica de barrido (MEB) y ensayos mecánicos de tracción. Los resultados demostraron que los tratamientos químicos fueron eficaces en modificar las propiedades superficiales de las fibras, evidenciado por una mayor estabilidad térmica, modificaciones en las bandas de infrarrojo, además de alteraciones en la superficie de las fibras visibles en el MEB. Los análisis morfológicos de los compuestos revelaron una mejor adhesión matriz–fibra en los materiales con fibras tratadas, con una reducción significativa de los espacios vacíos en la interfase. Los ensayos mecánicos mostraron que los compuestos formados con fibras tratadas presentaron un límite de resistencia a la tracción ligeramente superior al de aquellos con fibras no tratadas, de 19,4 MPa y 17,1 MPa respectivamente, lo que indica viabilidad para aplicaciones de exigencia mecánica media. Los análisis térmicos de los compuestos evidenciaron el mantenimiento de las propiedades térmicas del PP con la adición de fibras tratadas. El trabajo demuestra una ruta prometedora para agregar valor al bagazo de caña de azúcar y reducir los pasivos plásticos, contribuyendo a los principios de economía circular y sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: polipropileno, bagazo de caña de azúcar, compuestos, tratamiento.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

ABSTRACT

The debate on the use of polymeric materials and the negative implications of their improper disposal has intensified over the last decade, with researchers from various countries seeking alternatives to mitigate their environmental impact. Recycling, considered a low-cost and easily applicable process, can attenuate the effects of plastic waste and has proven to be effective in reducing its impact. Aligned with sustainability, natural fibers have shown to be promising materials, as their low cost and good properties encourage studies on their use in combination with polymeric matrices for composite materials. The present work had as its main objective the production and characterization of recycled polypropylene (PP) composites reinforced with sugarcane bagasse fibers, evaluating the efficiency of surface chemical treatments applied to the fibers to optimize compatibility with the polymeric matrix. The fibers were subjected to drying, grinding, sieving, and sequential chemical treatments of mercerization with alkaline solution and acetylation using acetic acid and acetic anhydride. The composites were prepared with treated and untreated fibers at concentrations of 5%, 10%, and 15% through mixing in a jar mill. Processing was carried out by injection molding in a mold with specific dimensions for mechanical testing. The characterizations performed included thermogravimetric analysis (TGA/DTG), infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), and mechanical tensile testing. The results demonstrated that the chemical treatments were effective in modifying the surface properties of the fibers, as evidenced by greater thermal stability, modification of infrared bands, and modifications in fiber surface visible in SEM. Morphological analyses of the composites revealed better matrix-fiber adhesion in materials with treated fibers, with significant reduction of void spaces at the interface. Mechanical tests showed that the composites formed with treated fibers exhibited a slightly higher tensile strength than those with untreated fibers, 19,4 MPa and 17,1 MPa, respectively, indicating feasibility for medium mechanical demand applications. The thermal analyses of the composites demonstrated the maintenance of the thermal properties of PP with the addition of treated fibers. The work demonstrates a promising route to add value to sugarcane bagasse and reduce plastic liabilities, contributing to principles of circular economy and environmental sustainability.

Key words: polypropylene, sugarcane bagasse, composites, treatment.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de classificação para materiais compósitos. 23
Figura 2 - Reação de polimerização do Polipropileno. 26
Figura 3 - Fibras de bagaço da cana-de-açúcar. 29
Figura 4 - Reação de acetilação em fibras naturais. 31
Figura 5 - Esquema do processo de injeção utilizado. 33
Figura 6 - Fluxograma do trabalho. 35
Figura 7 - Bagaço de cana-de-açúcar recém obtido (a) e Polipropileno triturado (b). 36
Figura 8 - Bagaço sendo triturado em moinho de facas. 37
Figura 9 - Jogo de peneiras utilizado no peneiramento. 37
Figura 10 - Mercerização das fibras. 38
Figura 11 - Fotografia das fibras após tratamentos químicos. 39
Figura 12 - Moinho gira jarro. 40
Figura 13 - Injetora utilizada no processamento. 42
Figura 14 - Molde para obtenção dos corpos de prova. 42
Figura 15 - Corpos de prova para ensaio mecânico. 43
Figura 16 - Curvas de TGA para fibras “in natura” (FNT), fibras mercerizadas (FTM) e fibras mercerizadas e acetialadas (FTMA) (a) e Curvas de DTG para fibras “in natura” (FNT), fibras mercerizadas (FTM) e fibras mercerizadas e acetiladas (FTMA) (b). 47
Figura 17 - Curva de DSC para o PP reciclado. 48
Figura 18 - FTIR das fibras naturais (FNT) e Tratadas (FMA). 50
Figura 19 - FTIR do polipropileno reciclado. 51
Figura 20 - Micrografias da fibra antes do tratamento químico (a), fibra mercerizada (b) e fibra mercerizada e acetilada (c). 52
Figura 21 - Micrografias dos compósitos reforçados com fibras “in natura” reforçados com 5% (a), 10% (b) e 15% (c) e compósitos reforçados com fibras tratadas reforçados com 5% (d), 10% (e) e 15% (f). 54
Figura 22 - Gráfico de comparação de tensão máxima para o Polipropileno puro e Compóstios reforçados com 5, 10 e 15% de fibras “in natura”. 57
Figura 23 - Gráfico de comparação de tensão máxima para o Polipropileno puro e Compóstios reforçados com 5, 10 e 15% de fibras tratadas. 58
Figura 24 - Gráfico de comparação de módulo elástico para o Polipropileno puro e Compóstios reforçados com 5, 10 e 15% de fibras “in natura”. 59
Figura 25 - Gráfico de comparação de módulo elástico para o Polipropileno puro e Compóstios reforçados com 5, 10 e 15% de fibras tratadas. 60
Figura 26 - Corpos de prova fraturados dos compósitos após os ensaios mecânicos 61
Figura 27 - Curvas de TGA para a matriz de PP e os compósitos com fibras "in natura" e modificadas. 62
Figura 28 - Curvas de TGA para a matriz de PP e os compósitos com fibras "in natura". 62
Figura 29 - Curvas de DTG para a matriz de PP e os compósitos com fibras "in natura". 63
Figura 30 - Curvas de TGA para a matriz de PP e os compósitos com fibras tratadas. 64
Figura 31 - Curvas de DTG para a matriz de PP e os compósitos com fibras tratadas. 65

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das propriedades entre termoplásticos e termorrígidos. 24
Tabela 2 – Nomenclatura das fibras utilizadas. 40
Tabela 3 - Composições dos materiais preparados. 41
Tabela 4 - Principais bandas no infravermelho para fibras naturais. 49
Tabela 5 - Dados obtidos no ensaio de tração 55

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PP.....Polipropileno
C_3H_6.....Propileno
Tm.....Temperatura de fusão
Tg.....Temperatura de transição vítrea
NaOH.....Hidróxido de Sódio
MEV .....Microscopia Eletrônica de Varredura
TGA.....Termogravimetria
DTG.....Termogravimetria Derivada
FTIR.....Infravermelho com transformada de Fourier
ASTM.....American Society for Testing and Materials
iPP.....Polipropileno isotático

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19

2 OBJETIVOS 21

2.1 OBJETIVO GERAL 21

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 21

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22

3.1 COMPÓSITOS 22

3.1.1 Compósitos de matriz polimérica 23

3.1.2 Compósitos reforçados com fibras naturais 25

3.2 POLIPROPILENO 26

3.3 BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR 28

3.4 INTERAÇÃO MATRIZ-REFORÇO 29

3.4.1 Mercerização 30

3.4.2 Acetilação 31

3.5 MOLDAGEM POR INJEÇÃO 32

4 METODOLOGIA 35

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS 36

4.2 PREPARO DAS FIBRAS 37

4.2.1 Mercerização das fibras 38

4.2.2 Acetilação das fibras 39

4.2.3 Obtenção dos compósitos 40

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

4.2.4 Obtenção dos corpos de prova 41

4.3 ANÁLISES TÉRMICAS 43

4.3.1 Análise Termogravimétrica (TGA) e Derivada Termográvimétrica (DTG) 44

4.3.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) 44

4.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) 44

4.6 ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) 45

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 46

5.1 ANÁLISE DAS FIBRAS 46

5.1.1 Análises térmicas 46

5.1.2 Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) 48

5.1.3 MEV 51

5.2 ANÁLISE DOS COMPÓSITOS 53

5.2.1 MEV 53

5.2.2 Ensaio mecânico 55

5.2.3 Análise térmica 61

CONCLUSÕES 66

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 68

REFERÊNCIAS 69

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

1 INTRODUÇÃO

A partir da Revolução Industrial e da consolidação dos meios de produção das novas industrias, o meio ambiente começou a ser modificado e prejudicado em decorrência da poluição gerada pela nova forma de produção que se instaurou na Europa e posteriormente por todo o planeta (Pott; Estrela, 2017). Os avanços legislativos e tecnológicos do último século foram fundamentais para estabelecer limites às empresas e garantir a diminuição do impacto ambiental, principalmente no descarte de rejeitos. Com o avanço da indústria e a descoberta do petróleo deu-se início à produção de polímeros, um dos tipos de materiais mais utilizados na contemporaneidade, eles estão presentes em diferentes tipos de peças, garrafas, brinquedos, encanamentos e sacolas (Silva; Rabelo, 2017).

Apesar de serem amplamente utilizados, os plásticos ocasionam problemas ecológicos graves, já que durante sua obtenção são liberadas grandes quantidades de gases poluentes como o dióxido de carbono na atmosfera (Vieira, 2021).

Com a limitação do uso dos combustíveis fósseis, seja pela falta de disponibilidade ou pela alta de preços, se torna cada vez mais interessante dos pontos de vista econômico e ecológico buscar alternativas sustentáveis para substituir os polímeros provenientes do petróleo (Zanchet et al., 2018). O Brasil o é quarto produtor mundial de resíduos plásticos, gerando cerca de 111 milhões de toneladas por ano, sendo que apenas 1% desse material é reaproveitado (Boronat et al., 2015).

Dentre os diversos tipos de polímeros utilizados na indústria moderna, o polipropileno destaca-se por sua versatilidade, baixo custo, boa resistência química e mecânica, além de ampla aplicabilidade nos setores automotivo, têxtil, de embalagens e de bens de consumo (Braskem, 2025). O grande consumo desse material tem contribuído significativamente para o acúmulo de resíduos plásticos em aterros e ambientes naturais, representando um desafio de sustentabilidade. Nesse contexto, a reciclagem do polipropileno torna-se uma estratégia fundamental para a mitigação de impactos ambientais, promoção da economia circular e redução da dependência de recursos fósseis.

A produção agrícola nacional também é responsável pela geração de diversos resíduos, dentre eles estão as fibras naturais lignocelulósicas, essas fibras de origem vegetal tem sido alvo de pesquisas para a obtenção de compósitos de matrizes poliméricas (Kotik, 2019). O bagaço da cana-de-açúcar é o principal rejeito da

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

produção de etanol através da planta, esse material é rico em fibras lignocelulósicas, que apresentam baixa densidade, alta resistência a solventes, baixa abrasividade, facilidade para modificação e baixo custo, o que torna esse resíduo interessante para a aplicação como fase de reforço em materiais compósitos (Gandara; Gonçalves e Saron, 2017).

Mediante os fatos apresentados, o presente trabalho visa obter e caracterizar um material compósito obtido através da reciclagem do PP e utilização e de rejeitos da produção de cana-de-açúcar, utilizando uma matriz de polipropileno reciclado reforçado com fibras do bagaço da cana-de-açúcar.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo principal a produção e caracterização de um material compósito, utilizando matérias primas obtidas através da reciclagem do polipropileno como matriz e resíduos do bagaço da cana-de-açúcar como reforço.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

i) Coletar o bagaço da cana de açúcar e realizar o preparo das fibras;
ii) Tratar quimicamente as fibras a fim de obter melhor adesão à matriz polimérica;
iii) Caracterizar o PP reciclado e as fibras de acordo com suas propriedades químicas, térmicas, microestruturais e morfológicas;
iv) Produzir compósitos de polipropileno reciclado como matriz com diferentes concentrações de fibras como reforço;
v) Caracterizar os compósitos formados de acordo com suas propriedades mecânicas, térmicas, morfológicas e microestruturais;
vi) Avaliar a influência da compatibilidade das fibras com a matriz nas propriedades do material;
vii) Avaliar a eficiência do tratamento superficial das fibras.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 COMPÓSITOS

Compósitos são materiais multifásicos, constituídos por mais de um material, que apresentam características oriundas da combinação das propriedades de seus constituintes (Callister, 2012). As combinações podem ser feitas com materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos e se diferenciam pelo processamento e tipo de reforço utilizado.

Atualmente, esses materiais possuem uma vasta gama de aplicações em diversas áreas tais como indústria aeronáutica, automobilística, naval, esportiva, construção e medicina. A grande empregabilidade dos compósitos nesses setores se deve as suas propriedades, que são projetadas de acordo com as necessidades de cada aplicação (Barud, 2006).

A matriz tem a função de incorporar e fixar o material de reforço, garantindo sua estabilidade dentro da estrutura do compósito. Além disso, é responsável por transmitir as tensões aplicadas para a fase de reforço. Esta fase, conhecida como fase dispersa ou simplesmente reforço, geralmente apresenta propriedades mecânicas superiores às da matriz e se distribui de forma uniforme em seu interior. Sua principal finalidade é melhorar a resistência mecânica do compósito, podendo estar presente nas formas particulada, lamelar ou fibrosa (Maia, 2017).

Os materiais compósitos são classificados de acordo com o tipo de reforço utilizado, esses materiais possuem três classificações principais: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais. Nos compósitos reforçados com partículas a fase dispersa é equiaxial, nos materiais reforçados com fibra a fase dispersa possui geometria de fibra, que podem ser orientadas ou aletórias, para maximizar a resistência do material. Já os compósitos estruturais são combinações de compósitos e materiais homogêneos (Callister, 2012).

A Figura 1 mostra as três principais divisões de materiais compósitos e suas subdivisões, baseadas na geometria e disposição da fase de reforço na matriz.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Figura 1 - Esquema de classificação para materiais compósitos.

Fonte: Callister (2012).

Os polímeros são largamente utilizados como matriz em materiais compósitos devido ao baixo peso e fácil processamento, onde não há uso de altas pressões ou temperaturas. Além disso, os problemas relacionados a degradação da fase dispersa durante a produção são menos significativos para esse tipo de matriz em comparação a matrizes metálicas e cerâmicas (Tita; Paiva; Frollini, 2002).

Os compósitos poliméricos são desenvolvidos e manufaturados para aplicações que necessitam de baixa densidade relativa e alta performance mecânica. As principais vantagens no uso desses materiais, em comparação com os materiais tradicionais, são: elevada razão densidade/rigidez, resistência a fadiga elevada, resistência a corrosão, estabilidade dimensional e baixo coeficiente de expansão térmica (Barud, 2006). Essas características tornam esses materiais alvos interessantes para estudos.

3.1.1 Compósitos de matriz polimérica

Segundo Lopes (2016), os polímeros são os materiais mais empregados como matrizes em compósitos, isso se deve as facilidades das condições de processamento de polímeros em comparação a metais e cerâmicas, onde não há necessidade de altas pressões e temperaturas para o processamento e moldagem do material. A escolha da matriz para um compósito é determinada pela aplicação ao qual o material será submetido e pelas propriedades desejadas, as principais características

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

requeridas para uma matriz polimérica são: propriedades mecânicas adequadas, boa tenacidade, resistência a degradação ambiental e processamento relativamente fácil (Lapique; Redford, 2002).

Os polímeros mais utilizados na produção de compósitos são os termofixos, que são polimerizados durante o processamento, eles possuem elevados índices de resistência mecânica e operam em faixas de temperatura superiores aos termoplásticos, mas não podem ser reciclados devido a sua estrutura totalmente amorfa que se degrada ao invés de fundir com o aumento de temperatura (Da Silva, 2014). Os termofixos mais comumente empregados na fabricação de compósitos são as resinas poliéster insaturadas, éster vinílicas, epóxi e fenólicas (Sobrinho, 2005).

Os polímeros termoplásticos possuem, de um modo geral, menores índices de resistência mecânica em comparação com os termofixos, mas a grande vantagem industrial da implementação de matrizes termoplásticas em compósitos é a processabilidade dos materiais. O uso desses polímeros possibilita uma maior fabricação de peças em um tempo menor, além da possibilidade de serem reutilizados após fundidos. As matrizes termoplásticas mais empregadas são o polipropileno e o polietileno de alta densidade e de baixa densidade (Decker, 2020). A Tabela 1 compara os dois tipos de polímeros e suas propriedades:

Tabela 1 - Comparação das propriedades entre termoplásticos e termorrígidos.

Termoplásticos	**Termofixos**
Recicláveis	Não recicláveis
Tempo ilimitado de armazenamento	Tempo limitado de armazenamento
Alta viscosidade quando fundido	Baixa viscosidade no processamento
Baixa resistência a fluência	Alta resistência a fluência
Temperatura de uso limitada a Tg e Tm	Não funde, degrada diretamente ou infusível
Baixa estabilidade térmica	Alta resistência térmica

Fonte: Adaptado, De Paula (2011).

O crescimento na fabricação e elaboração de materiais compósitos baseados em termoplásticos tem se intensificado, impulsionado principalmente por

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

considerações relacionadas à sustentabilidade ambiental, uma vez que esses materiais termoplásticos apresentam a capacidade de serem reprocessados (De Paula, 2011).

3.1.2 Compósitos reforçados com fibras naturais

As fibras podem ser definidas como materiais flexíveis, com homogeneidade macroscópica e elevada razão entre comprimento e diâmetro, elas podem ser classificadas como sintéticas ou naturais, de acordo com sua origem. Fibras naturais podem ser derivadas de minerais, animais e vegetais, já as sintéticas podem ter diversas origens a depender do material utilizado e do processamento aplicado na fabricação. As fibras naturais de origem vegetal são em sua maioria heterogêneas, já que sua formação varia de acordo com o tipo de matéria prima de obtenção da fibra, condições climáticas, tipo de solo do plantio, fertilizantes e máquinas utilizadas na colheita (Da Silva, 2014).

A aplicação de fibras naturais em compósitos vem sendo intensamente estudada em pesquisas focadas na sustentabilidade. Por serem originadas de recursos renováveis, essas fibras oferecem várias vantagens quando comparadas às fibras sintéticas, como preço reduzido, menor densidade, capacidade de biodegradação e ausência de propriedades abrasivas. Além de ajudar a diminuição do impacto ambiental, por serem biodegradáveis, as fibras naturais possibilitam a produção de materiais mais leves e sustentáveis. Sua natureza não abrasiva também reduz o desgaste de equipamentos durante o processamento, resultando em menor necessidade de manutenção e maior vida útil das ferramentas. Essas características tornam as fibras naturais uma alternativa promissora na formulação de compósitos ecológica e economicamente viáveis (Fraga et al., 2006).

O teor de fibras incoporado a matriz tem influência direta nas propriedades finais dos compósitos, mas as mudanças nas caractrísticas do material podem ser não ser significativas a partir de um ponto, concentrações de reforço acima de 15% não apresentam grandes diferenças nas propriedades finais de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais quando comparadas a toeres de fibras de até 15% (Souza, 2021).

Embora as fibras de origem natural apresentem propriedades atrativas, elas possuem limitações significativas quando comparadas às fibras sintéticas. Elas

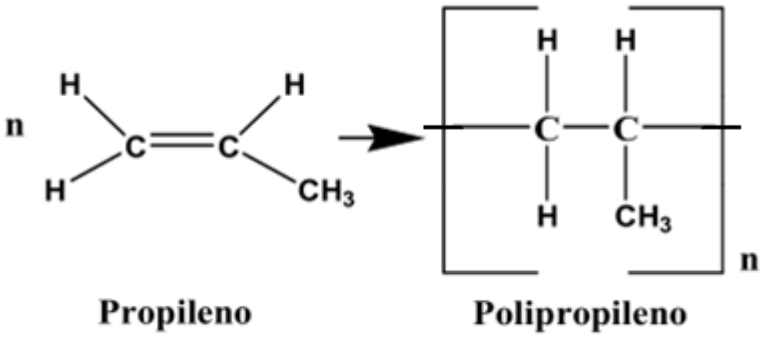
Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

apresentam variações de características devido à baixa uniformidade estrutural, alta de absorção de umidade que pode comprometer o desempenho mecânico e provocar alterações dimensionais, restrições quanto à temperatura de processamento, propensão ao agrupamento que dificulta a distribuição uniforme na matriz polimérica e, consequentemente, compromete as propriedades finais do compósito (De Paula, 2011).

3.2 POLIPROPILENO

O polipropileno (PP) é um polímero termoplástico pertencente à família das poliolefinas, obtido a partir da polimerização do monômero propileno (C_3H_6) por meio de reações de poliadição, como mostrado na Figura 2. Esse processo consiste na adição sucessiva de monômeros insaturados a uma cadeia polimérica em crescimento. A síntese do PP é comumente realizada com o uso de catalisadores estereoespecíficos, como os sistemas Ziegler-Natta ou metalocêntricos, os quais conferem maior controle sobre a estrutura estereoquímica do polímero, permitindo a produção de diferentes formas táticas, como a isotática, a sindiotática e a atática. Entre essas, o PP isotático (iPP) se destaca por apresentar as melhores propriedades térmicas e mecânicas, sendo amplamente utilizado na indústria (Callister, 2012).

Figura 2 - Reação de polimerização do Polipropileno.



Fonte: Nascimento, et al (2019).

Fisicamente, o polipropileno é um material semicristalino com grau de cristalinidade médio de 60%, dependendo das condições de processamento. Essa característica influencia diretamente suas propriedades finais, como resistência

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

mecânica e estabilidade térmica. Além disso, apresenta uma temperatura de transição vítrea (Tg) em torno de -20 °C e temperatura de fusão (Tm) por volta de 170 °C, o que o torna adequado para aplicações que exigem resistência térmica moderada (Canevarolo, 2006; Osswald; Menges, 2012).

Do ponto de vista químico, o polipropileno destaca-se por sua boa resistência à maioria dos solventes orgânicos e baixa absorção de umidade, sendo um material hidrofóbico. Essas características, combinadas à sua facilidade de processamento, tornam o PP altamente versátil, sendo amplamente utilizado em processos industriais como moldagem por injeção e extrusão. As principais aplicações abrangem desde utensílios domésticos, embalagens alimentícias, monofilamentos para redes e cordas, até componentes automotivos, materiais hospitalares e dispositivos de laboratório (BRASKEM, 2025).

No Brasil, o polipropileno é a resina termoplástica mais consumida, representando 19,7% do total de consumo, com destaque para a indústria alimentícia (ABIPLAST, 2024). Essa ampla utilização se deve não apenas às suas boas propriedades físico-químicas, mas também à sua capacidade de modificação. Entretanto, como todo polímero de origem fóssil, o polipropileno apresenta desafios ambientais relacionados ao seu descarte inadequado e à sua longa persistência no ambiente.

Diante disso, o reaproveitamento do PP pós-consumo tem se mostrado uma alternativa viável para mitigar os impactos ambientais. A reciclagem, tanto mecânica quanto química, vem sendo explorada como estratégia para promover a economia circular e reduzir a geração de resíduos plásticos, incentivando a valorização desses materiais no contexto industrial e ambiental (Jafelice, 2013). A reciclagem do polipropileno pode ocorrer por meio de diferentes rotas, sendo a mecânica a mais adotada comercialmente. Nesse processo, os resíduos plásticos são coletados, lavados, moídos e reprocessados, mas semelhante a qualquer processo industrial, a reciclagem do PP pode gerar modificações no material devido a presença de impurezas e da deteriorização das cadeias poliméricas, ocasionando a perda de propriedades desejadas (Lago, 2022).

Para mitigar esses efeitos negativos, diversas estratégias têm sido estudadas, como a adição de estabilizantes térmicos, agentes antioxidantes, compatibilizantes ou ainda o uso de fibras naturais ou sintéticas como reforço em compósitos. Rosário et al, 2011 destacam que a incorporação de aditivos ou cargas pode recuperar ou até

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

melhorar as propriedades do polipropileno reciclado, tornando-o competitivo em aplicações menos exigentes.

Além das aplicações tradicionais, o polipropileno reciclado tem sido utilizado com sucesso na produção de compósitos poliméricos com fibras lignocelulósicas, como as de bagaço de cana-de-açúcar, fibras de coco, entre outras. Brandão, 2015 observou o aumento do módulo elástico, tensão ao escoamento e limite de resistência a tração em compósitos de PP reforçados com fibras naturais em comparação ao polipropileno puro. Essas combinações promovem um uso mais racional de recursos e contribuem para o desenvolvimento de materiais sustentáveis de baixo custo e boa performance, gerando materiais capazes de competir com plásticos de engenharia tradicionais (Ishizaki, et al, 2006).

3.3 BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

O Brasil ocupa uma posição de destaque global no cultivo da cana-de-açúcar e no processamento de seus subprodutos. A partir desta matéria-prima vegetal, é possível extrair uma ampla gama de produtos, incluindo açúcar cristal, álcoois de uso industrial, combustíveis líquidos e ceras. Para além dos produtos obtidos por meio do processamento direto da cana-de-açúcar, os subprodutos resultantes também apresentam múltiplas aplicações, sendo o bagaço da cana o rejeito gerado em maior volume na agroindústria nacional, podendo ser empregado como fonte de biomassa para combustão e geração energética, proporcionando autossuficiência energética ao ciclo produtivo, incluindo ainda sua utilização como reforço fibroso em materiais compósitos (De Paula, 2011).

O bagaço da cana-de-açúcar resulta do processamento da planta através da trituração para a obtenção do sumo destinado à produção dos derivados principais. O resíduo fibroso recentemente processado apresenta em sua constituição aproximadamente 50% de humidade, 45% de componentes lignocelulósicos e 5% de materiais sólidos de natureza solúvel e insolúvel, configurando um sistema de composição heterogêna (De Paula, 2011). As fibras lignocelulósicas possuem composição complexa, elas são constituídas por fibras de celulose envoltas em matrizes amorfas de lignina, a matriz serve como proteção a enzimas e micro-organismos, tornando as fibras pouco reativas (Venceslau, 2018). Na Figura 3 abaixo é possível observar as fibras depois da moagem da cana-de-açúcar.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Figura 3 - Fibras de bagaço da cana-de-açúcar.

Fonte: Blog MF Rural.

As fibras presentes no colmo da planta possuem uma grande heterogeneidade química e morfológica, além de possuir uma superfície altamente polar, características que podem influenciar negativamente o material final. As fibras podem ser processadas por diferentes maneiras para melhorar sua aplicabilidade, como moagem e peneiramento que promovem diminuição de tamanho e homogeneidade. Em matrizes poliméricas apolares as fibras podem apresentar baixa compatibilidade interfacial, dificultando a adesão com a matriz e prejudicando o desempenho do material, essa incompatibilidade pode ser melhorada através de técnicas químicas e físicas, que aumentam a adesão e a dispersão das fibras na matriz (Oliveira, 2018).

3.4 INTERAÇÃO MATRIZ-REFORÇO

As características de um compósito dependem diretamente do tipo de reforço empregado e suas interações com a matriz, essas interações ocorrem na região de interfase, que se diferencia do resto do sistema por propriedades únicas ou microestrutura diferente, ela é responsável pela conexão entre as fibras e a matriz polimérica, e por consequência está diretamente associada a transferência de forças entre matriz e reforço. Além das possíveis incompatibilidades das fibras naturais com outros materiais, suas propriedades mecânicas e composição tendem a apresentar grande variabilidade. Por esse motivo, a modificação dessas fibras torna-se

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

fundamental para viabilizar aplicações em tecnologias mais avançadas. Esses tratamentos têm como finalidade padronizar as propriedades das fibras, aumentar sua afinidade e aderência com a matriz polimérica e reduzir a capacidade de absorção de água, já que os compostos orgânicos que compõe as fibras naturais dão a esses materiais características altamente hidrofílicas, o que diminui a compatibilidade com matrizes apolares (Nohara et al, 2007).

Existem vários tipos de modificações químicas e físicas que podem ser realizadas em fibras naturais, cada processo gera resultados diferentes e deve ser escolhido de acordo com as propriedades desejadas. Segundo Reichert, 2018 o tratamento químico de fibras de bagaço da cana-de-açúcar elevou as propriedades mecânicas do material e aumentou a estabilidade térmicas das fibras. Os principais métodos utilizados para a modificação das fibras são o tratamento com silano, acetilação, benzoilação e alcalinização.

As fibras de bagaço de cana, quando merceirizadas com hidróxido de sódio, obtiveram melhorias significantes em sua compatibilidade com a matriz (Carvalho Neto et al, 2009). Em geral, diferentes mecanismos podem otimizar as propriedades das fibras naturais, de modo a promover a formação de interações com o polímero, homogeneização e redução níveis de absorção de humidade (Oliveira, 2019).

3.4.1 Mercerização

A mercerização é um tratamento químico realizado em meio alcalino que promove significativas alterações nas fibras vegetais lignocelulósicas, como as obtidas do bagaço de cana-de-açúcar. Durante a mercerização, ocorre a remoção de componentes amorfos das fibras, como hemicelulose e lignina, o que promove o aumento da cristalinidade da celulose presente nas fibras e induz mudanças morfológicas significativas na superfície das fibras (Albinante; Pacheco; Visconte, 2013).

Análises realizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelam superfícies mais limpas, porosas e rugosas nas fibras tratadas, em comparação com fibras sem tratamento. Essas características resultam em um melhor intertravamento mecânico entre a fibra e a matriz, especialmente em compósitos de matriz polimérica (Albuquerque, 2019).

A estabilidade térmica das fibras mercerizadas é outro aspecto beneficiado pelo

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

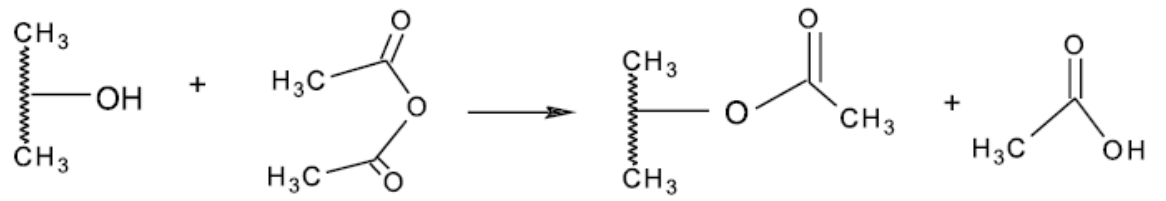
tratamento alcalino. Estudos mostram que as fibras tratadas apresentam temperaturas de decomposição mais elevadas, assim como aumentaram a estabilidade térmica dos compósitos em que foram inseridas. Esse comportamento térmico melhorado torna as fibras mais resistentes a processos de degradação térmica, favorecendo seu uso em compósitos processados em temperaturas elevadas. (Zanini et al, 2018).

Júnior, 2017 observou que fibras de bambu tratadas com solução alcalina, quando incorporadas a matrizes poliméricas, proporcionaram melhorias significativas nas propriedades mecânicas do material, aumentando significativamente a resistência a tração quando tradas com solução de 5% (m/v) de NaOH.

3.4.2 Acetilação

A acetilação é um tratamento químico empregado em materiais lignocelulósicos com o objetivo de tornar suas superfícies mais hidrofóbicas, por meio da introdução de grupos acetila ($–COCH_3$) nos grupos hidroxila das fibras naturais, a reação pode ser vista na Figura 4. Este processo ocorre, geralmente, pela reação das fibras com anidrido acético, frequentemente na presença de catalisadores ácidos ou alcalinos (Albinante; Pacheco; Visconte, 2013).

Figura 4 - Reação de acetilação em fibras naturais.



Fonte: Albinante; Pacheco; Visconte (2013).

Nas fibras de bagaço de cana-de-açúcar, a acetilação tem se mostrado uma técnica eficaz para reduzir a absorção de umidade e melhorar a compatibilidade com matrizes poliméricas apolares. Segundo Santos et al (2013), a acetilação realizada após a mercerização do bagaço de cana de açúcar proporcionou aumento da adesão entre fibras e matriz e melhorou a processabilidade do compósito.

Os efeitos da acetilação nas propriedades mecânicas e térmicas das fibras

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

naturais também foram investigados por D'Almeida; Calado; Barreto, (2005). Os autores observaram que a modificação acetílica em fibras de origem vegetal promoveu uma redução significativa da absorção de umidade. Essa transformação favorece a adesão das fibras a matrizes poliméricas hidrofóbicas, resultando em materiais com propriedades mecânicas mais homogêneas e com menor sensibilidade à umidade.

Dessa forma, a acetilação é considerada uma alternativa viável para agregar valor às fibras de bagaço de cana-de-açúcar, especialmente em aplicações voltadas para a fabricação de compósitos com matrizes polimérica. A técnica permite não apenas ampliar a durabilidade dos materiais em ambientes úmidos, como também contribuir para a substituição de reforços sintéticos por fibras naturais modificadas.

3.5 MOLDAGEM POR INJEÇÃO

O processo de moldagem por injeção é uma das tecnicas de conformação de termoplásticos mais autilizadas na industria de polimeros, graças a sua repetibilidade e possibilidade de produzir peças com geometria complexa e bom acabamento superficial. A moldagem por injeção é um processo em que o material polimérico é aquecido até um ponto ótimo para o escoamento e posteriormente injetado em um molde fechado sob pressão, onde o material se solidifica adquirindo a forma desejada (De Blasio, 2007). Esse método de processamento possui quatro etapas principais: alimentação, plastificação, injeção e resfriamento para retirada do molde. Na plastificação o material, normalmente em forma de pellets, é aquecido até o ponto de fusão, em seguida, o material é injetado em alta velocidade no molde, o qual está a uma temperatura inferior à de fusão do polímero, promovendo sua solidificação na cavidade do molde. (Rosato; Rosato, 2004).

A eficiência do processo está atrelada a parâmetros como temperatura de injeção, pressão de injeção, velocidade de injeção, tempo de resfriamento e forma do molde. A qualidade da peça final depende destas variáveis, elas influenciam diretamente na microestrutura e nas propriedades do material, como resistência mecânica e estabilidade dimensional. Se os parâmetros da injeção não forem os ideais, a peça final pode apresentar defeitos como bolhas, linhas de solda e empenamentos (De Blasio, 2007).

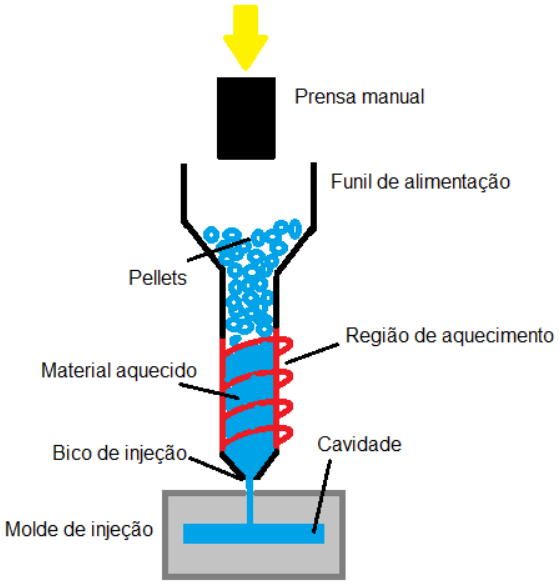
A velocidade de injeção é a velocidade com que o material fundido é empurrado para dentro do molde até o seu preenchimento, uma velocidade muito alta gera uma

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

grande taxa de cizalhamento, necessitando de altas pressões de injeção para o preenchimento da cavidade, já para velocidades baixas, a taxa de cisalhamento é menor, o que ocasiona na diminuição de temperatura do material fundido devido a troca de calor por condução. Um preenchimento a uma velocidade e temperaturas adequadas assegura uma contração uniforme, dando melhor qualidade ao produto final. (Fernandes et al., 2011).

O funcionamento da máquina injetora utilizada neste trabalho está ilustrado na Figura 5, nela a aplicação de pressão é manual, o operador deve acionar uma alavanca para que uma prensa empurre os pellets para a região de aquecimento. O material na região de aquecimento passa pelo processo de fusão devido ao calor fornecido pelas resistências, elas têm sua temperatura monitorada por um controlador de temperatura que apresenta instabilidades nas medidas informadas. Após a fusão do polímero, a prensa é acionada para injetar o material na cavidade do molde posicionado abaixo da injetora, quando a cavidade é completamente preenchida o molde é retirado dessa posição, até o resfriamento completo da peça, quando a mesma é retirada do molde.

Figura 5 - Esquema do processo de injeção utilizado.



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2025).

A fabricação de peças complexas, que necessitam alta tolerância e acabamento, exigem rigorosos controles de processo. Segundo Agrawal; Pandelidis;

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

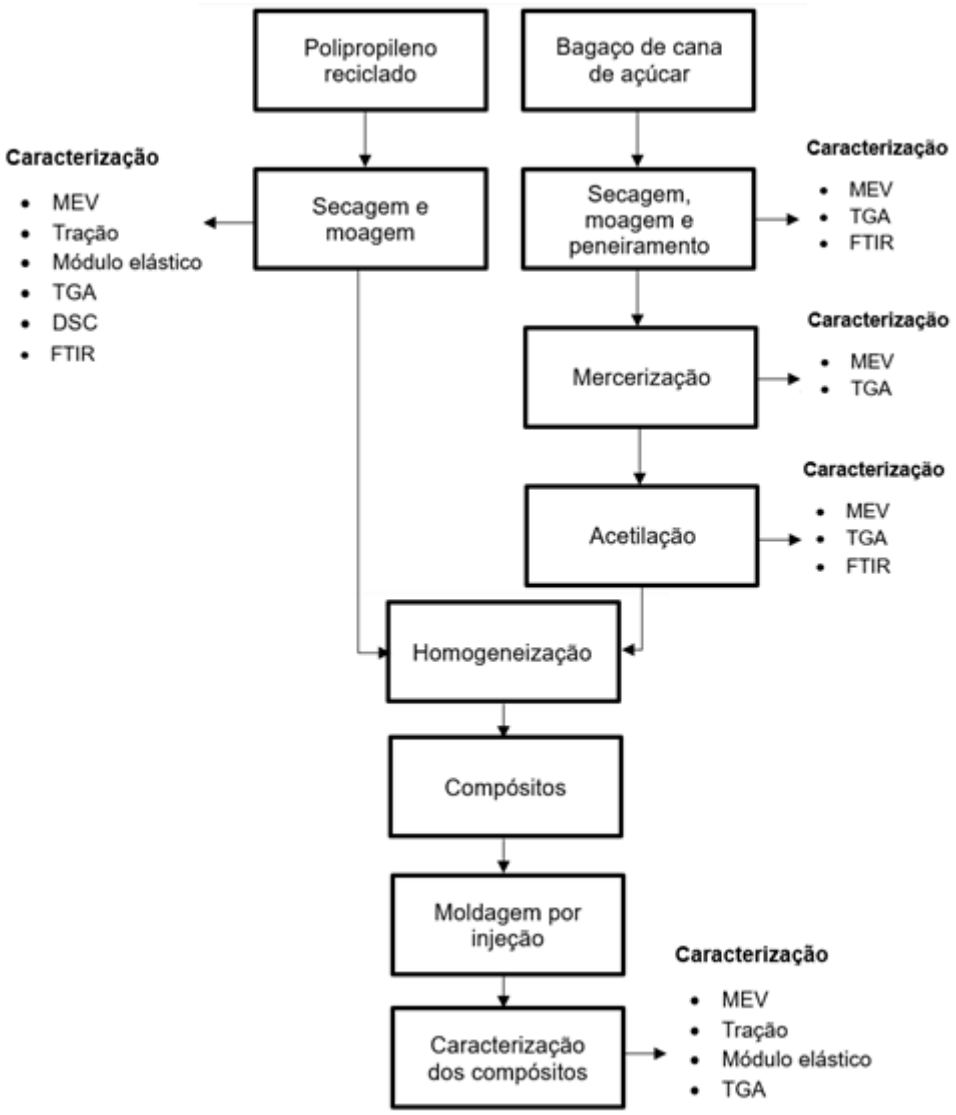
Pecht (2010) controlar a moldagem por injeção de forma eficaz requer a compreensão interdisciplinar de áreas como mecânica, química, ciência de materiais, computação e estatística, e sua análise exige conhecimentos de fluxo de fluidos newtonianos, transferência de massa e energia e elementos finitos. Todas essas particularidades tornam a moldagem por injeção um processo interessante para a produção de peças complexas de forma rápida e reprodutível, desde que todos os parâmetros do processo sejam conhecidos e controlados de forma correta.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

4 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais, métodos, equipamentos e análises empregados para a obtenção e caracterização dos compóstios de polipropileno reforçados com fibras de bagaço de cana de açúcar. A Figura 6 mostra através de um fluxograma a rota seguida durante o trabalho.

Figura 6 - Fluxograma do trabalho.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais necessários para a execução do presente trabalho podem ser divididos em três catagorias: fase dispersa, matriz polimérica e reagentes. Para a fase dispersa foi utilizado bagaço de cana de açúcar cedido pela Pastelaria Pastel Dourado de Foz do Iguaçu – PR, o bagaço "*in natura*" pode ser vizualizado na Figura 7 (a).

A matriz polimérica empregada foi o polipropileno reciclado cedido pela empresa Teysa S.R.L Matriceria na forma de pallets, que foi posteriormente moído para facilitar sua homogeneização com as fibras e aumentar sua área superficial. A Figura 7 (b) mostra o PP reciclado após o processo de moagem.

Os reagentes usados foram: Solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) 8% (m/v), Anidrido acético ($C_4H_6O_3$) PA, PM 102,08 g/mol da marca Vetec, Ácido acético glacial ($C_2H_4O_2$) PA, PM 60,05 g/mol da marca CRQ e Ácido sulfúrico (H_2SO_4) em solução de 20%, todos os reagentes foram utilizados no tratamento superficial das fibras e tinham como principal função melhorar a interação entre a fase dispersa e a matriz.

Figura 7 - Bagaço de cana-de-açúcar recém obtido (a) e Polipropileno triturado (b).

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

4.2 PREPARO DAS FIBRAS

O bagaço de cana-de-açúcar foi previamente preparado para utilização como reforço na matriz de polipropileno. Inicialmente, o bagaço de cana foi submetido a uma primeira secagem em estufa a 60 °C por 24 horas, a fim de reduzir a umidade natural do material. Após essa etapa, o bagaço foi moído em um moinho de facas da marca Lucadema modelo 226/2 do Instituto Federal do Paraná (IFPR) para a obtenção de fibras com menor tamanho (Figura 8).

Figura 8 - Bagaço sendo triturado em moinho de facas.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Em seguida as fibras foram secas novamente em estufa a 80 °C por 24 horas para remoção completa de humidade. As fibras então forma secas e submetidas a um processo de peneiramento utilizando um jogo de peneiras de análise granulométrica com telas de aço inox da marca a brozinox (Figura 9), e as fibras retidas na peneira de 100 mesh (aproximadamente 150 mícrons) foram selecionadas com a finalidade de otimizar a dispersão na matriz devido ao menor diâmetro. Após o peneiramento as fibras apresentam uma maior homogeneidade de diâmetro e possibilitam melhor dispersão na matriz, já que apresentam tamanho significativamente inferior comparadas com as fibras “*in natura*”.

Figura 9 - Jogo de peneiras utilizado no peneiramento.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

4.2.1 Mercerização das fibras

O tratamento alcalino foi aplicado com o intuito de remover cera e lignina das fibras, além de aumentar sua ancoragem mecânica na matriz com o aumento da rugosidade. A mercerização foi realizada com uma solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) a 8% (m/v), na proporção de 100 g de fibra para cada litro de solução, as fibras foram imersas na solução por 1 hora a 80 °C, sob agitação constante (Figura 10).

Figura 10 - Mercerização das fibras.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

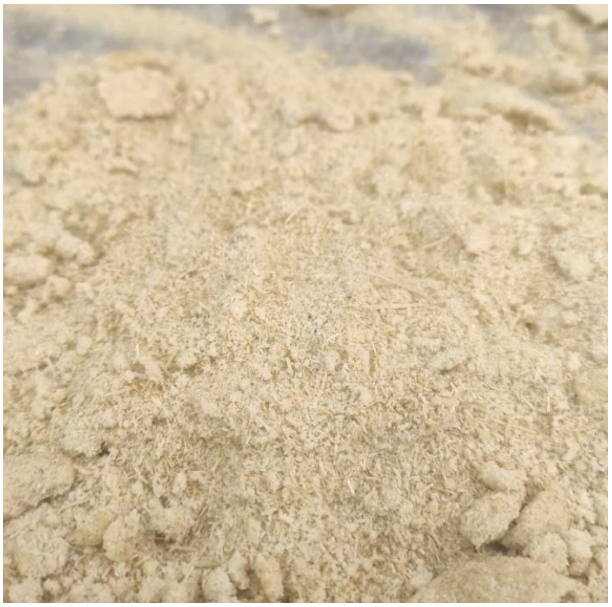
Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Após o tratamento, as fibras foram lavadas com água destilada até atingirem pH neutro, para a completa remoção do reagente alcalino. Em seguida, as fibras foram submetidas a secagem em estufa a 80 °C por 24 horas.

4.2.2 Acetilação das fibras

O tratamento de acetilação teve como base o procedimento de (D'Almeida; Calado; Barreto, 2005), visando promover a substituição de grupos hidroxila por grupos acetila, tornando as fibras menos hidrofílicas, aumentando assim a compatibilidade das fibras com a matriz polimérica. No tratamento, as fibras já mercerizadas foram imersas em uma solução de ácido acético e anidrido acético (1,0:1,5 em massa) além de 10 gotas de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a cada 250 ml de solução como catalisador. A reação foi conduzida a 100 °C por 2 horas sob agitação constante, nela foram utilizados 150 g de fibras para 213 mL de ácido acético e 320 mL de anidrido acético. A Figura 11 mostra as fibras após todos os procedimentos realizados.

Figura 11 - Fotografia das fibras após tratamentos químicos.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Após o procedimento, as fibras foram lavadas com água destilada até atingirem pH neutro e secas novamente em estufa a 80 °C por 24 horas. A Tabela 2 mostra as nomenclaturas utilizadas nos trabalhos para os diferentes tipos de fibras com base no

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

tratamento empregado.

Tabela 2 – Nomenclatura das fibras utilizadas.

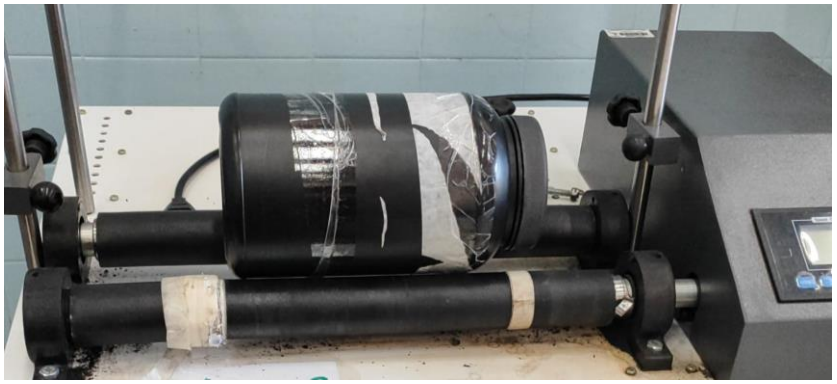
Amostra	Tratamento
FNT	Nenhum
FTM	Mercerização
FTMA	Mercerização e Acetilação

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

4.2.3 Obtenção dos compósitos

O Polipropileno empregado como matriz foi moído em um moinho de facas (Lucadema modelo 226/2) para facilitar a homogeneização com a fase dispersa. A mistura do PP com as fibras tratadas e não tratadas foi feita em um moinho gira jarro (Marca Matoli), os materiais permanaceram sob rotação por 4 horas, afim de promover a melhor dispersão possível entre as fases (Figura 12).

Figura 12 - Moinho gira jarro.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Foram elaborados 6 tipos compósitos com concentrações de reforço diferentes, variando entre 5%, 10% e 15%, utilizando fibras tratadas e não tratadas, além do polipropileno puro que serviu como referência. A Tabela 3 apresenta as proporções de composição de cada material e sua respectiva nomeclatura.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Tabela 3 - Composições dos materiais preparados.

Amostra	Fibras de Bagaço	Polipropileno	Tratamento
PP	0%	100%	Não
CPBN5	5%	95%	Não
CPBN10	10%	90%	Não
CPBN15	15%	85%	Não
CPBT5	5%	95%	Sim
CPBT10	10%	90%	Sim
CPBT15	15%	85%	Sim

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

4.2.4 Obtenção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos através de moldagem por injeção, utilizando uma injetora termoplástica do modelo MAQ-3000M (Figura 13). O molde utilizado (Figura 14) possuia cavidades para ensaios de tração, de acordo com a norma ASTM D638. Os grânulos dos compósitos foram alimentados no funil da máquina e processados a 180 °C conforme as características térmicas do polipropileno reciclado e das fibras, após a temperatura ideal atingida a prensa era acionada e empurrava o material fundido para dentro da cavidade do molde.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Figura 13 - Injetora utilizada no processamento.

Fonte: Injetora de plástico manual, s.d (2025).

Figura 14 - Molde para obtenção dos corpos de prova.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

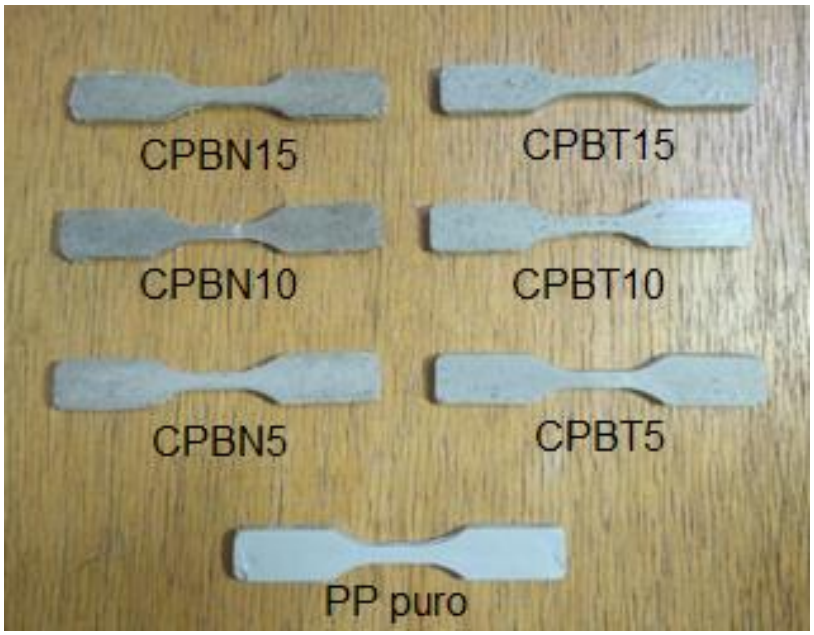
Alguns parâmetros necessários para o desempenho ideal do processamento, como a pressão aplicada e a temperatura, não puderam ser totalmente controlados devido a limitações da máquina utiizada. A aplicação de pressão foi manual, através de uma alavanca, e o controlador de temperatura apresentou pequenas instabilidades durante o processo, provocando flutuações de temperatura na injeção. A falta de controle dessas varáveis podem ter prejudicado a estrutura e o desempenho dos

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

corpos de prova, esse tema será abordado durante a seção de resultados e discussão.

Após a injeção, os corpos de prova foram mantidos no molde para o resfriamento à temperatura ambiente, a fim de garantir estabilização dimensional e a integridade das amostras. Em seguida, as peças foram desmoldadas, identificadas e armazenadas para posterior caracterização (Figura 15).

Figura 15 - Corpos de prova para ensaio mecânico.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

4.3 ANÁLISES TÉRMICAS

As análises térmicas foram realizadas com o objetivo de avaliar a estabilidade térmica e as transições físicas e químicas da fase de reforço, da matriz e dos compósitos, bem como a influência do tratamento superficial nas fibras e da adição de fibras modificadas na matriz, em função da perda de massa quando submetidas a uma variação de temperatura. As técnicas utilizadas foram a Análise Termogravimétrica (TGA) e Termogravimetria Derivada (DTG) e a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

4.3.1 Análise Termogravimétrica (TGA) e Derivada Termográvimétrica (DTG)

A análise termogravimétrica foi conduzida nas fibras em estado “*in natura*”, nas fibras submetidas à mercerização e à acetilação, no polipropileno reciclado, bem como nas seis formulações distintas de compósitos. Para isso, utilizou-se o equipamento analisador termogravimétrico da marca PerkinElmer por meio do qual foram obtidas as curvas correspondentes de TGA e DTG.O ensaio foi realizado sob atmosfera de nitrogênio, razão de aquecimento de 10 °C/min e uma faixa de temperatura de 30 a 600 °C.

4.3.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A análise DSC foi realizada para determinar as transições térmicas no polipropileno reciclado. As amostras foram submetidas a atmosfera de nitrogênio, uma faixa de temperatura de 30 a 500 °C e razão de aquecimento de 20 °C/min.

4.4 ENSAIO MECÂNICO

Os ensaios mecânicos tiveram como objetivo avaliar o desempenho dos compósitos sob solicitações mecânicas, com base nas normas da ASTM D638 para tração. Os testes foram realizados nas 6 variações de compósitos e no polipropileno reciclado, utilizou-se 6 corpos de prova para cada tipo de amostra.

O equipamento onde as medidas foram realizadas foi uma máquina MTS Criterion 45, com célula de carga de 100 kN e velocidade de 5mm/min.

4.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada para avaliar a morfologia das estruturas das fibras “*in natura*”, mercerizadas, acetiladas. A técnica também foi empregada nos compósitos para a avaliação da dispersão das fibras avaliar e sua interação com a matriz. As amostras foram previamente preparadas com uma deposição de ouro e paládio para otimizar a condução de elétrons nas fibras vegetais e na matriz polimérica, permitindo a obtenção de imagens de alta qualidade. O microscópio de varredura utilizado foi o modelo Zeiss EVO-MA10, operando com uma tensão de 10 kV.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

4.6 ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

A técnica de FTIR foi empregada para investigar as modificações químicas na superfície das fibras após os tratamentos de mercerização e acetilação, e para análise do polipropileno reciclado em relação ao PP virgem. As amostras foram misturadas na proporção de 1 mg de amostra para 100 mg de brometo de potássio (KBR), maceradas em gral de ágata e prensadas a 10 Toneladas para obtenção das pastilhas. As análises foram realizadas em um Espectrômetro Infravermelho da marca e modelo Perkin Elmer Frontier MIR+SP10 STD, o intervalo de varredura foi de 4000 a 500 cm^{-1}, a resolução de 16 cm^{-1} e varredura de 64.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo expõe os resultados obtidos nas caracterizações das fibras naturais não tratadas, das fibras mercerizadas e acetiladas, do polipropileno reciclado, bem como dos compósitos de polipropileno incorporados com 5, 10 e 15% de fibras de bagaço de cana-de-açúcar como material de reforço.

5.1 ANÁLISE DAS FIBRAS

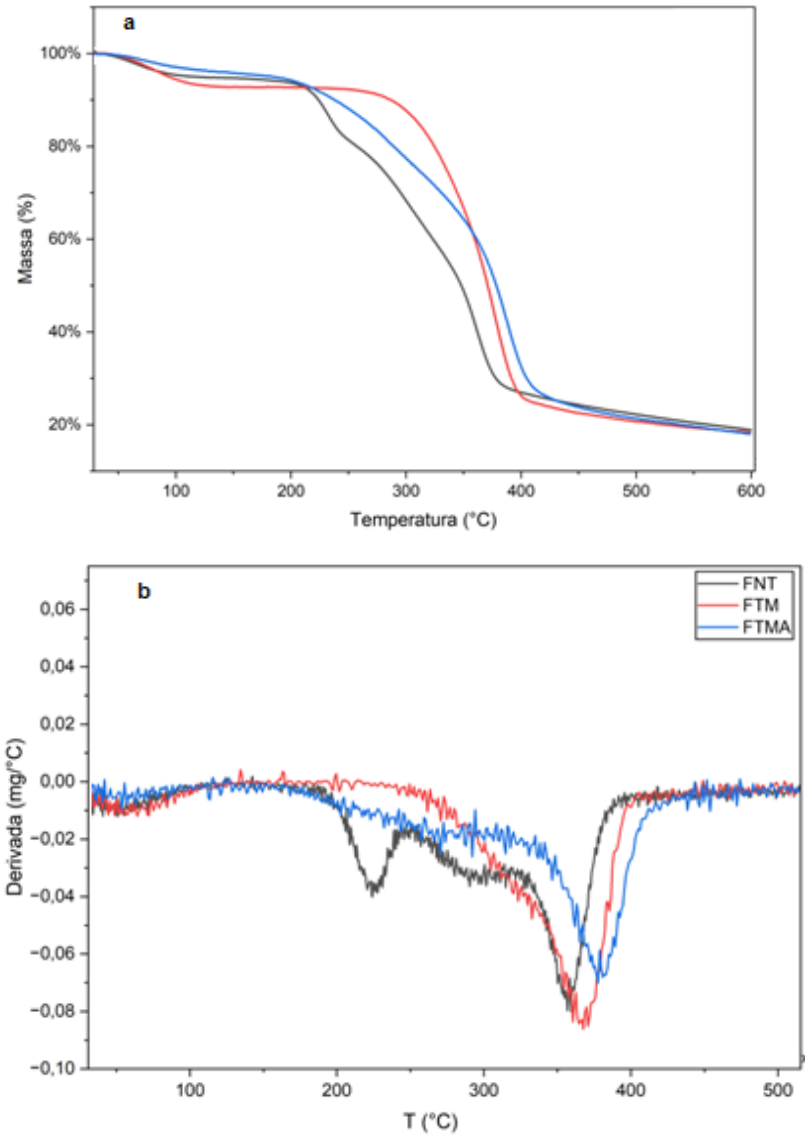
5.1.1 Análises térmicas

A Análise termogravimétrica foi utilizada para avaliar a estabilidade térmica das fibras de bagaço de cana “*in natura*” e tratadas, avaliar a estabilidade térmica do PP puro e a partir da análise foram obtidas curvas de TGA e DTG.

A Figura 16 mostra as curvas de TGA e DTG, elas apresentam a perda de massa relativa das fibras em função da temperatura. As curvas de DTG aprentam semelhanças entre as fibras tratadas e não tratadas, o primeiro pico evidenciado ocorre abaixo dos 100 °C e é atribuido a perda de umidade das fibras, devido ao caráter hidrofílico das mesmas. A curva de TGA mostra que a perda de massa abaixo dos 100 °C foi menor nas fibras acetiladas, o que indica que o tratamento obteve relativo sucesso em aumentar a hidrofobicidade das fibras.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Figura 16 - Curvas de TGA para fibras "*in natura*" (FNT), fibras mercerizadas (FTM) e fibras mercerizadas e acetialadas (FTMA) (a) e Curvas de DTG para fibras "*in natura*" (FNT), fibras mercerizadas (FTM) e fibras mercerizadas e acetiladas (FTMA) (b).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

O segundo estágio notável de perda de massa pelas curvas de TGA acontece na faixa de temperatura entre 210 °C e 380 °C, esse estágio apresenta dois picos bem definidos nas fibras não tratadas, e apenas um pico para as fibras tratadas.

As fibras "*in natura*" apresentam um pico da curva de DTG na temperatura de 223 °C, referente a decomposição dos constituintes amorfos, como ceras e graxas, e outro pico em 356 °C referente a degradação térmica da celulose e hemicelulose. Para as fibras tratadas, a ausência do pico na faixa de 220 a 230 °C indica que os tratamentos superficiais removeram os componentes amorfos das fibras. O último estágio de decomposição das fibras acontece em 325 °C para as fibras não tratadas,

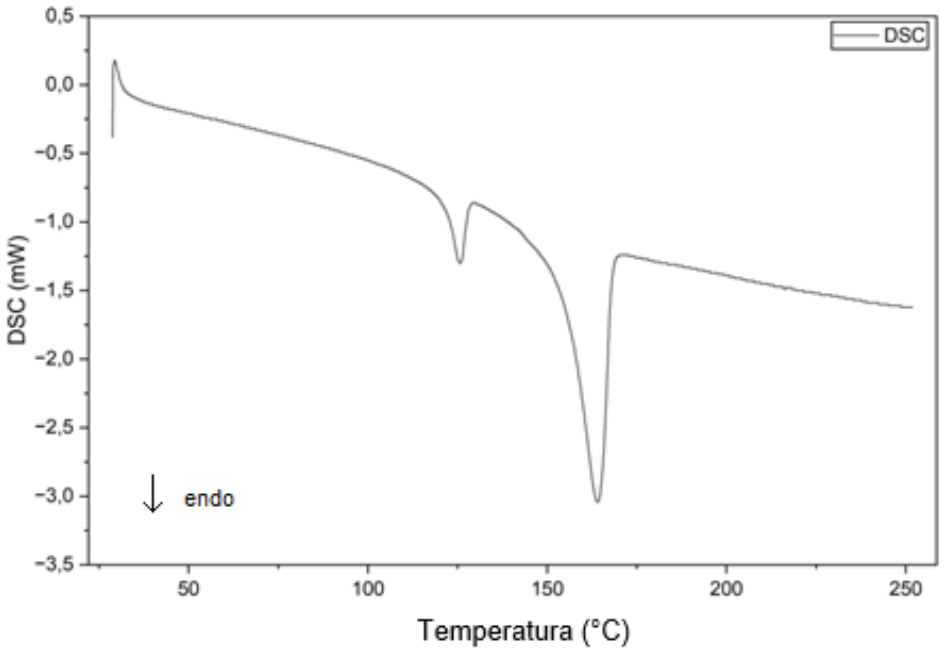
Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

e a partir de 350 °C nas fibras mercerizadas e acetiladas (FTMA).

As curvas de TGA evidenciam que as fibras "*in natura*" são estáveis termicamente até cerca de 200 °C, onde começam seu estágio de decomposição, já as fibras tratadas apresentaram um deslocamento da curva para temperaturas maiores, indicando que os tratamentos aplicados aumentaram a estabilidade térmica das fibras.

Na Figura 17 está a curva de DSC obtida para o polipropileno recilado utilizado como matriz. Ao comparar o resultado com a literatura (Nakatani et al, 2022), percebe-se um evento endotérmico em 125°C, incomum para curvas de PP puro e outro a 165°C. O primeiro evento é atribuído a presença de impurezas incorporadas ao material durante o processo de reciclagem, podendo se tratar da fusão de outros polímeros pela faixa de temperatura, já o segundo corresponde a Tm do polipropileno e está de acordo com o esperado para este polímero segundo a literatura.

Figura 17 - Curva de DSC para o PP reciclado.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

5.1.2 Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) Temperatura (°C)

Os ensaios de FTIR foram realizados nas fibras de bagaço de cana de açúcar "*in natura*" e após os tratamentos superficiais de mercerização e acetilação com o

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

intuito de avaliar a eficácia dos procedimentos. A Tabela 4 apresenta as principais bandas características de fibras naturais na região do infravermelho, para comparação das bandas das fibras com e sem tratamento.

Tabela 4 - Principais bandas no infravermelho para fibras naturais.

Número de onda (cm^{-1})	Vibrações	Fonte
3300	O-H deformação axial	Polissacarídeos
2885	C-H estiramento simétrico	Polissacarídeos
2850	CH_2 estiramento simétrico	Gorduras
1732	C=O estiramento	Xilanas (hemicelulose)
1650-1630	OH (água)	Água
1505	C=C estiramento	Lignina
1240	C-O grupo aril	Lignina
1162	C-O-C estiramento assimétrico	Celulose e hemicelulose
670	C-OH ligação fora do plano	Celulose

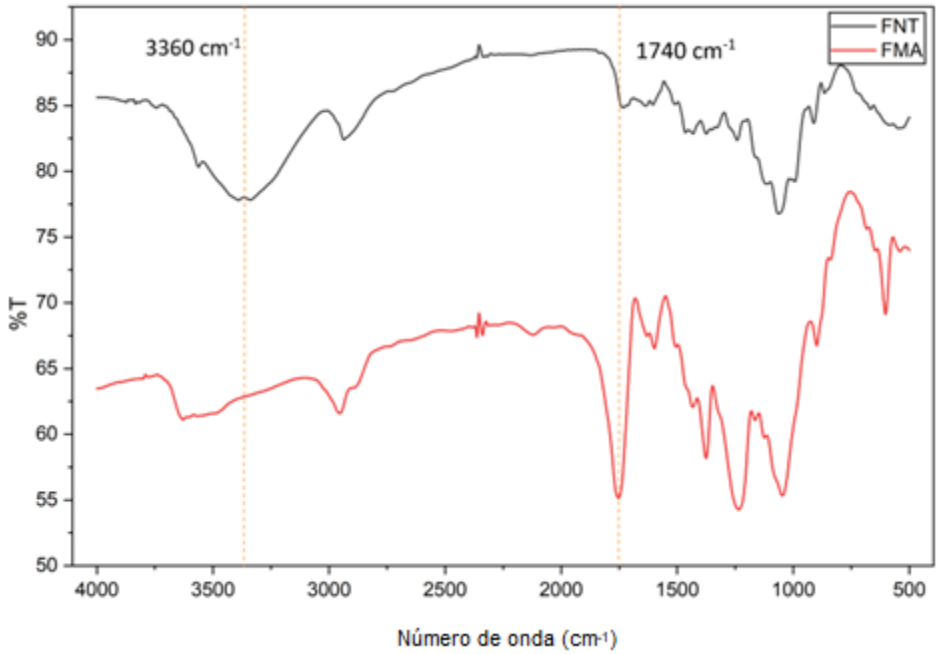
Fonte: Adaptado de LE TROEDEC et al (2008).

A Figura 18 compara os espectros de infravermelho para a fibras de bagaço de cana de açúcar, antes e após os tratamentos superficiais.

Observando ambos os espectros, percebe-se a diminuição significativa da intensidade do sinal na região de 3360 cm^{-1} nas fibras tratadas em realação as fibras "*in natura*", essa banda é característica dos grupos hidroxilas (OH) presentes na estrutura da celulose e que favorecem a absorção de humidade. A presença da banda nas fibras tratadas mostra que a acetilação não foi completa, apesar da notável diminuição de intensidade. A redução desses grupos funcionais diminui a higroscopicidade do material, fato que pode ser verificado pela baixa perda de massa abaixo de 100 °C em comparação as fibras não acetiladas, durante a termogravimetria.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Figura 18 - FTIR das fibras naturais (FNT) e Tratadas (FMA).



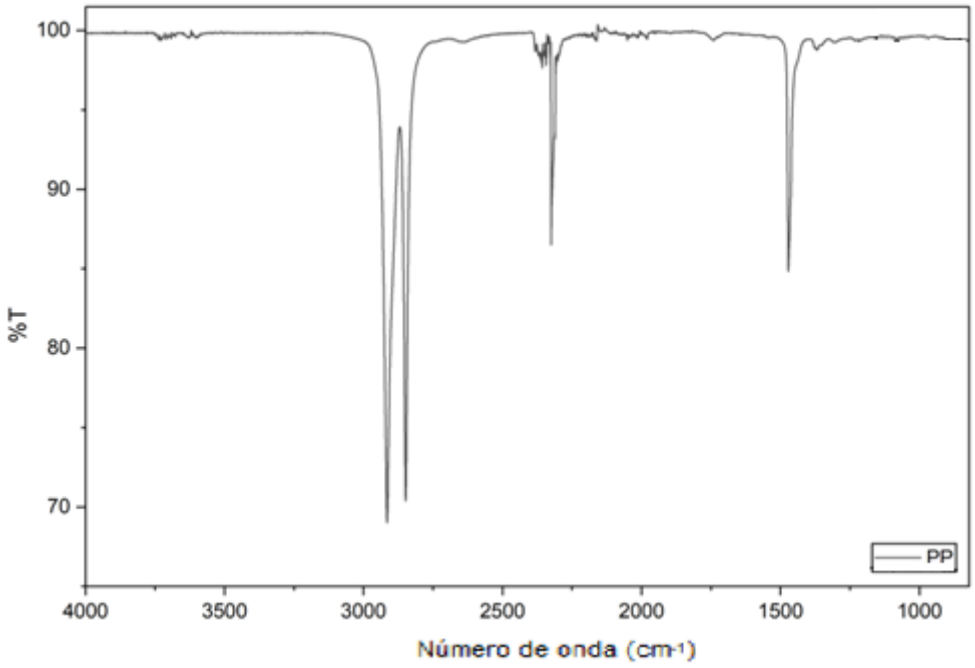
Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Outra alteração que pode ser observada é a amplificação da intensidade na banda de 1740 cm^{-1} no espectro das fibras acetiladas. A maior intensidade do sinal observado se deve a presença de grupos carbonila (C=O) de ésteres. O surgimento das carbonilas é um forte indício da reação de acetilação, que juntamente com a dimuição do sinal das hidroxilas, confirma a reação de acetilação das fibras do bagaço de cana de açúcar. Número de onda (cm^{-1})

A Figura 19 apresenta o resultado de FTIR para o PP reciclado, com bandas caracteísticas do polipropileno virgem. Entre 2700 e 3000 cm^{-1} aparecem picos devido a absorção de C-H e ao estiramento C-H_3. Já em 1450 cm^{-1} a banda está relacionada a vibrações de deformação assimétrica C-H_3 (Gombar, 2013). Para a banda em 2350 cm^{-1}, não há correspondências na literatura para o PP puro, esse sinal é geralmente atribuído a ligações triplas como nitrilas ou a isocianatos (Araújo et al, 2019). A presença do pico na faixa de 2300 cm^{-1} pode ser atribuída a presença de impurezas no material, como outros polímeros, incorporadas durante o processo de reciclagem.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Figura 19 - FTIR do polipropileno reciclado.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

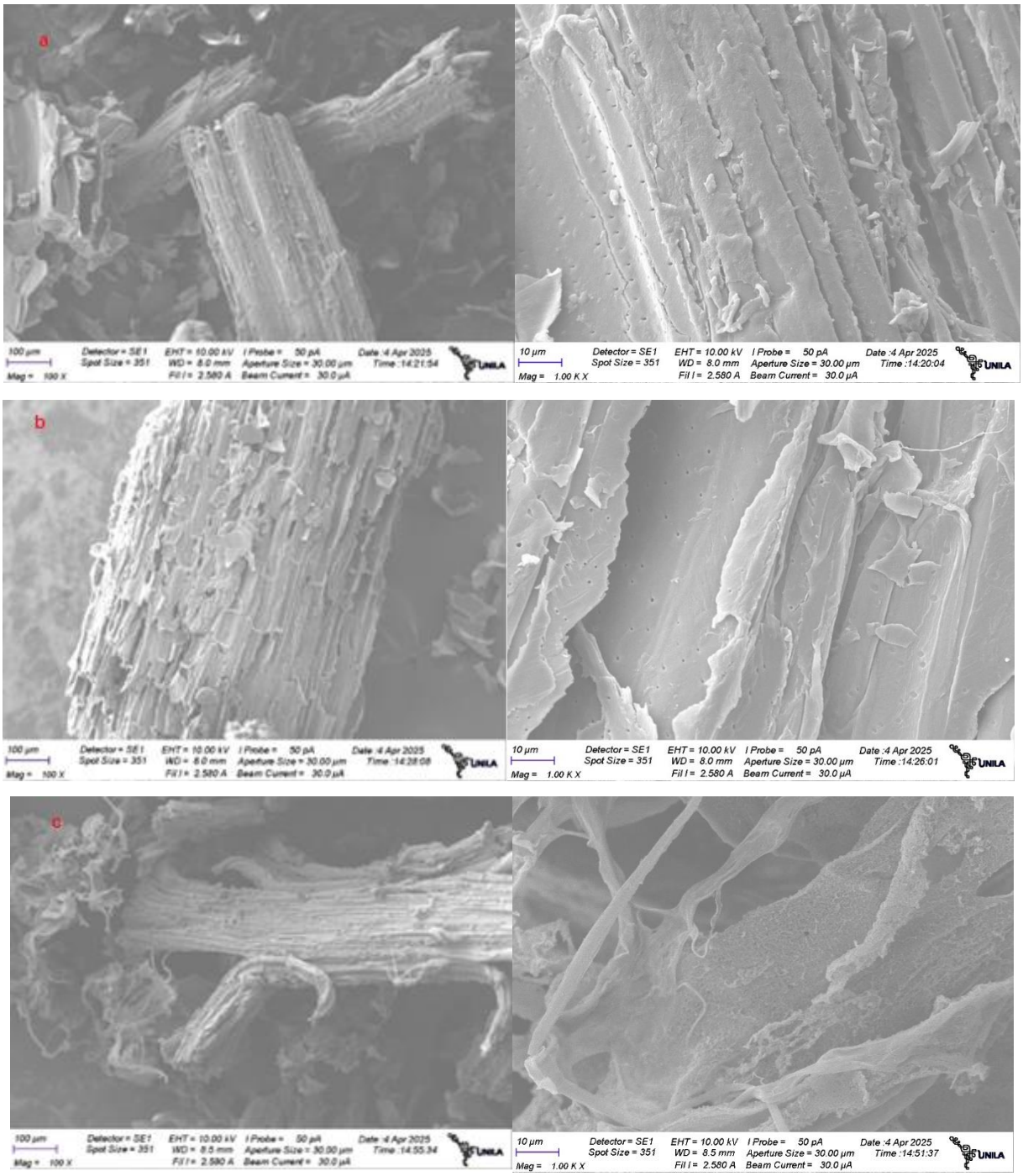
5.1.3 MEV

As análises morfológicas das fibras do bagaço de cana-de-açúcar "*in natura*", mercerizadas e acetiladas foram realizadas por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura. O principal objetivo da análise foi investigar a eficiência dos tratamentos superficiais aplicados nas fibras.

A Figura 20 (a) apresenta as micrografias das fibras antes dos tratamento químicos. É possível obervar que as fibras apresentam poros, também chamados de "*pits*", em sua estrutura, eles são pequenos orifícios distribuidos ao longo da superfície de fibras naturais e são responsáveis pelo transporte de água e nutrientes, além de ajudarem na adesão com o polimero. (Florindo, 2017). As fibras "*in natura*" possuem uma superfície relativamente rugosa em comparação as fibras mercerizadas e acetiladas, com a presença de ceras oriundas da hemicelulose e da lignina presentes em sua estrutura. As ceras localizadas na superfície das fibras geram concentração de umidade, o que dificulta a interação ideal entre matriz e reforço (Oliveira, 2018).

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Figura 20 - Micrografias da fibra antes do tratamento químico (a), fibra mercerizada (b) e fibra mercerizada e acetilada (c).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

A Figura 20 (b) mostra as imagens obtidas para as fibras após o tratamento de mercerização. É possível observar o aumento da rugosidade superficial ao longo das fibras em comparação as fibras não tratadas. De acordo com Lazarini (2020), o tratamento com NaOH elimina a lignina presente nas fibras, deixando-as mais rugosas além de expor os grupos higroscópicos presentes na estrutura.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Além da remoção de componentes indesejados e aumento de rugosidade, é notável o aumento do número de “*pits*” visíveis na superficie das fibras, já que a mercerização removeu a parte que estava acima.

A Figura 20 (c) apresenta as fibras de bagaço de cana-de-açúcar após os tratamentos de mercerização e acetilação. Ao se comparar as imagens obtidas depois da acetilação, percebe-se o aumento da exposição das camadas internas das fibras e consequentemente de sua área superficial. O processo tornou as superficies ainda mais rugosas e promoveu um entrelaçamento entre as fibras menores.

As imagens obtidas corroboram com os resultados da análise térmica e de FTIR, confirmando a eficácia dos tratamentos empregados para melhorar a compatibilidade das fibras com a matriz de polipropileno reciclado.

5.2 ANÁLISE DOS COMPÓSITOS

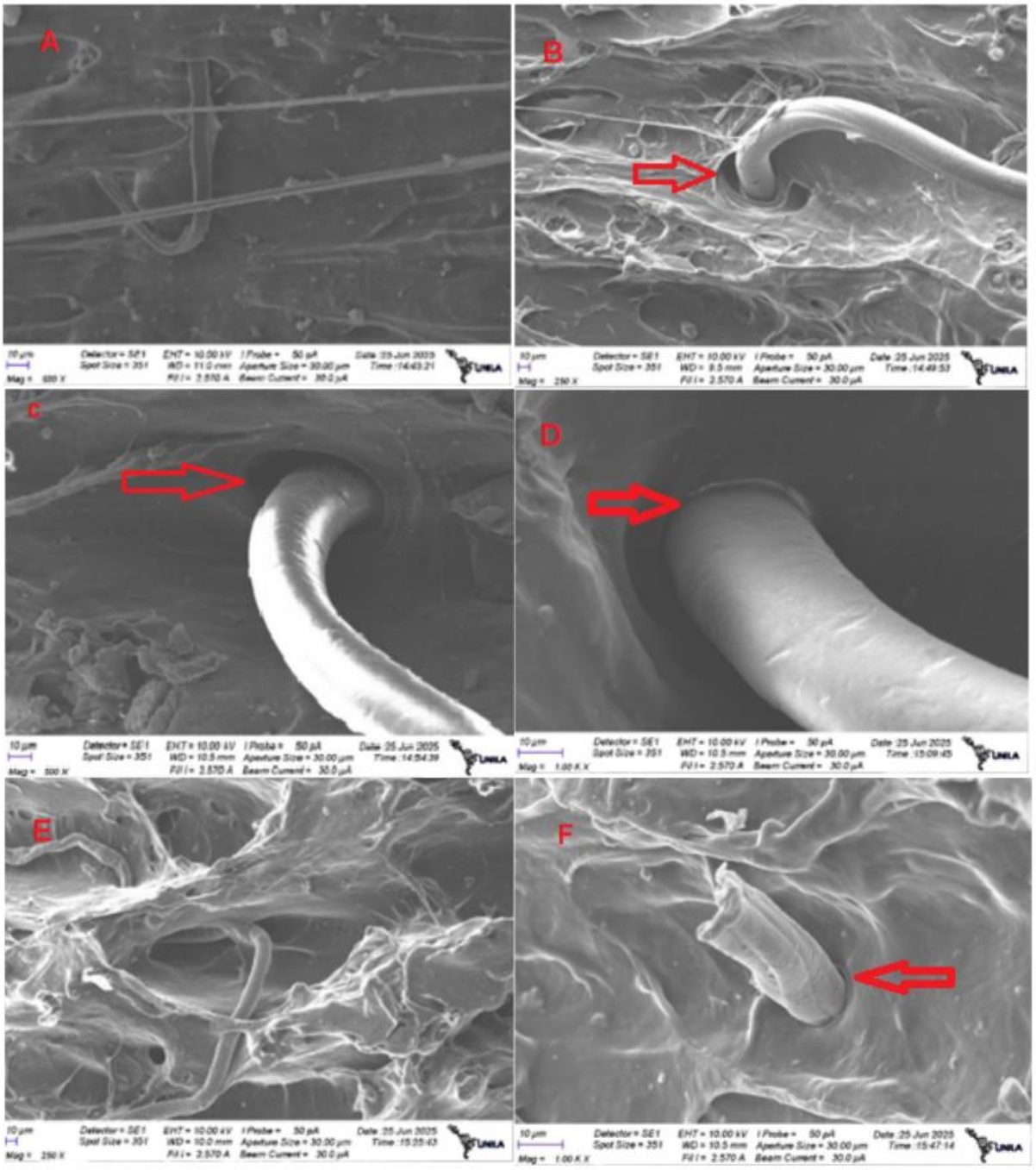
5.2.1 MEV

A Microscopia Eletrônica de Varredura foi empregada na análise dos compósitos reforçados com 5, 10 e 15% de fibras “*in natura*” e nos compósitos reforçados com 5, 10 e 15% de fibras tratadas, com a intenção de avaliar a interação das fibras de bagaço de cana-de-açúcar com a matriz polimérica. Na Figura 21 são apresentadas as micrografias dos compósitos com fibras não tratadas e tratadas, respectivamente.

As imagens dos compóstios reforçados com fibras “*in natura*” evidenciam uma pior ancoragem da fase dispersa em comparação com as fibras submetidas ao tratamento, nelas é possível visualizar espaços vazios entre as fibras e a matriz, indicando que a adesão não foi completa.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Figura 21 - Micrografias dos compósitos reforçados com fibras "*in natura*" reforçados com 5% (a), 10% (b) e 15% (c) e compósitos reforçados com fibras tratadas reforçados com 5% (d), 10% (e) e 15% (f).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

As micrografias dos compósitos reforçados com fibras modificadas, revelam fibras mais impregnadas pela matriz, onde os espaços entre matriz e reforço são significativamente menores em relação aos compósitos reforçados com fibras não tratadas. Sanchez et al, (2010) também observou mudanças nos aspectos superficiais

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

de fibras de cana-de-açúcar tratadas em meio alcalino, quando inseridas em uma matriz polimérica, as fibras modificadas apresentaram melhor interação com a matriz de poliéster, melhor dispersão e melhoras nas propriedades mecânicas dos compósitos em comparação com compósitos de fibras não tratadas. Esse fato indica que a adesão das fibras com a matriz foi otimizada através dos tratamentos químicos empregados durante o trabalho. O aumento da adesão entre matriz e reforço é um fator determinante para a melhora das propriedades de materiais compósitos, e através das análises de MEV foi possível constatar que os procedimentos de mercerização e acetilação realizados nas fibras melhoraram a interação entre as fases.

5.2.2 Ensaio mecânico

Os ensaios mecânicos foram realizados nos corpos de prova de polipropileno, nos compósitos reforçados em 5, 10 e 15% de fibras "*in natura*" e nos compósitos reforçados com 5, 10 e 15% de fibras tratadas, onde foram obtidos resultados referentes a Tensão Máxima e Módulo de Elasticidade das amostras. A análise dos resultados teve como base o valor médio das amostras submetidas ao ensaio, os dados obtidos através dos ensaios mecânicos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados obtidos no ensaio de tração.

Amostras	Limite de resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
PP	23,2 ± 0,90	2624,1 ± 45
CPBN5	16,3 ± 4,32	2734,0 ± 586
CPBN10	15,8 ± 1,38	2551,5 ± 64
CPBN15	17,1 ± 2,30	2483,8 ± 234
CPBT5	17,7 ± 1,64	2146,6 ± 147
CPBT10	18,2 ± 1,73	2335,0 ± 142
CPBT15	19,4 ± 2,10	2217,0 ± 163

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

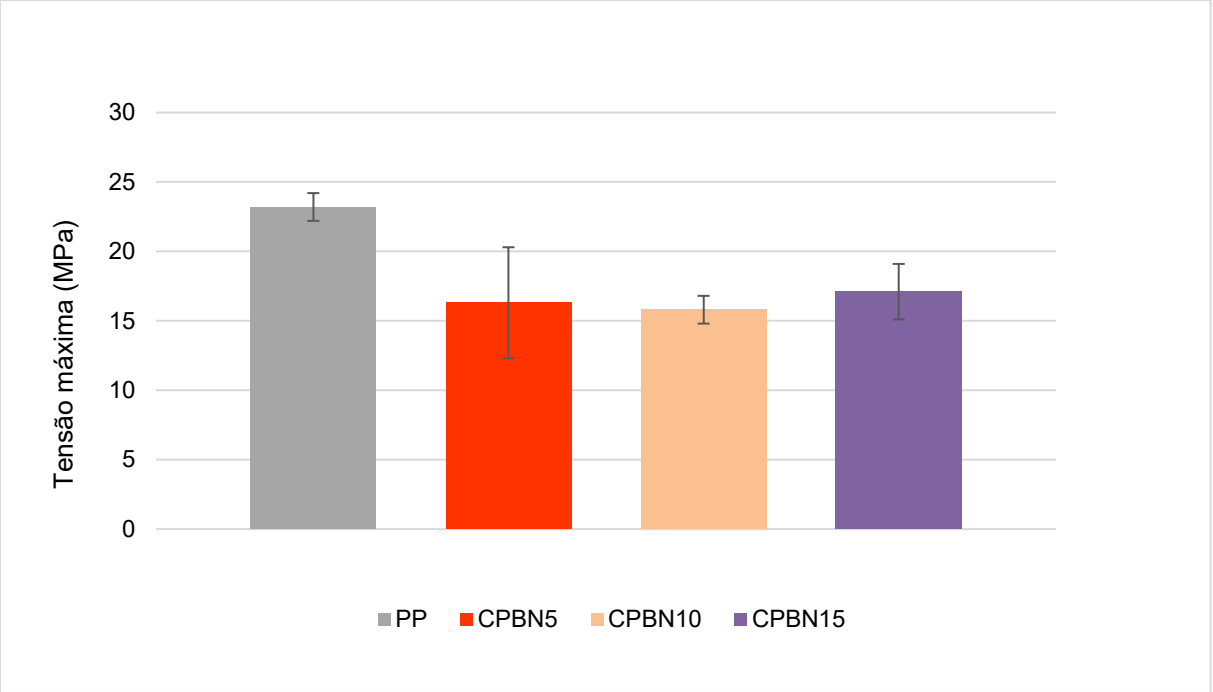
O Polipropileno recilado apresenteou um limite de resistência a tração de 23,2 MPa, número inferior aos resultados para o PP virgem encontrado na literatura consultada, onde há variação entre os resultados, mas todos estão próximos a 30MPa. Para o módulo elástico, o PP apresentou um resultado acima do encontrado na literatura, com módulos geralmente em torno de 1000 MPa (Colonetti et al, 2018; De Paula, 2011 e Luz et al, 2006). A matriz de PP mostrou limite de resistência a tração superior a todas as variações de compósitos desenvolvidas. Entre os compósitos com fibras "*in natura*", o melhor resultado obtido para o limite de resistência a tração foi o da amostra reforçada com 15% de fibras, apresentando 17,1 MPa. Nos compósitos reforçados com fibras modificadas, o melhor resultado também foi observado na amostra com 15% de fibras na composição.

Para o Módulo Elástico, o maior aumento registrado foi da amostra reforada com 5% de fibras "*in natura*", representando um acréscimo de 4,2% em relação a matriz de polipropileno puro. Nos compósitos de fibras tratadas ocorreu um decréscimo no módulo de elasticidade em todas as amostras analisadas.

A Figura 22 exibe os resultados da Tensão Máxima obtida nos ensaios de tração para a matriz pura e dos compóstios de fibras não tratadas. A Tensão Máxima diminuiu com a composião de 5% de fibras na matriz, decaindo de 23,2 MPa para 16,3 MPa, representando uma redução de 29,5%. A amostra CPBN10 teve uma redução ainda maior em comparação com a matriz pura, tendo uma diminuição de 32% no valor obtido. Para o compósito CPBN15 o limite de resistência a tração foi de 17,1 MPa, representando uma redução de 26% em relação ao polipropileno puro.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Figura 22 - Gráfico de comparação de tensão máxima para o Polipropileno puro e Compóstios reforçados com 5, 10 e 15% de fibras "*in natura*".



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

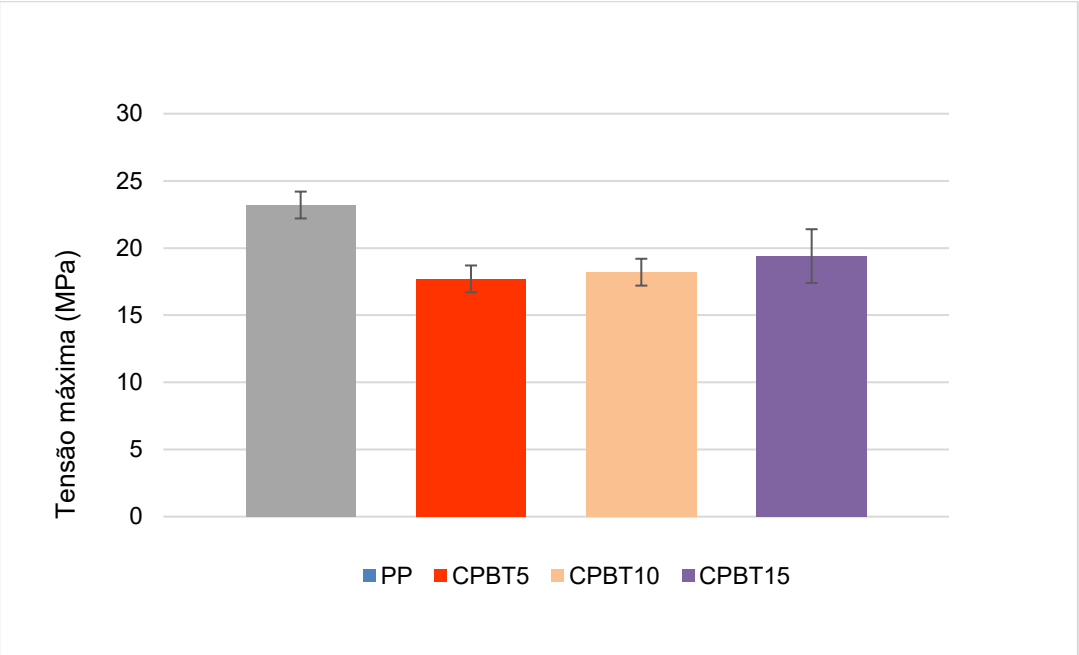
A Figura 23 apresenta os resultados da Tensão Máxima obtida nos ensaios de tração para a matriz pura e dos compóstios de fibras tratadas. De forma semelhante aos compósitos de fibras "*in natura*", a adição de fibras causou a diminuição do limite de resistência a tração em todas as amostras. Entretanto, para os materiais reforçados apenas com fibras modificadas, o acréscimo do teor de fibras representou um aumento no valor da propriedade analisada. Para a amostra CPBT5, o limite de resistência representou uma diminuição de 23,5% quando comparado a matriz polimérica, já para a amostra CPBT10 a redução foi de 21,5%, enquanto a redução foi de 16% para a amostra CPBT15. O compósito reforçado com 15% de fibras tratadas quimicamente apresentou o maior limite de resistência a tração entre todas as amostradas de compósitos submetidas ao ensaio.

Os resultados obtidos mostram a diminuição no valor do limite de resistência a tração com a adição das fibras do bagaço de cana-de-açúcar. Sampaio (2019) analisou a incorporação de fibras de bagaço de cana-de-açúcar a matrizes termoplásticas de polietileno, e notou que os compósitos apresentaram redução do limite de resistência a tração com o aumento do teor de fibras, diminuindo signficativamente os resultados em relação a matriz pura, o resultado foi justificado pela falta de compatibilidade entre matriz e reforço. Brandão, 2015 estudou

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

compósitos de PP reforçados com fibras de cana tratadas quimicamente e aferiu um aumento de 23% no limite de resistência a tração em relação a matriz pura, demonstrando que a adição de fibras tratadas ao polipropileno contribui para o aumento de resistência a tração.

Figura 23 - Gráfico de comparação de tensão máxima para o Polipropileno puro e Compóstios reforçados com 5, 10 e 15% de fibras tratadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

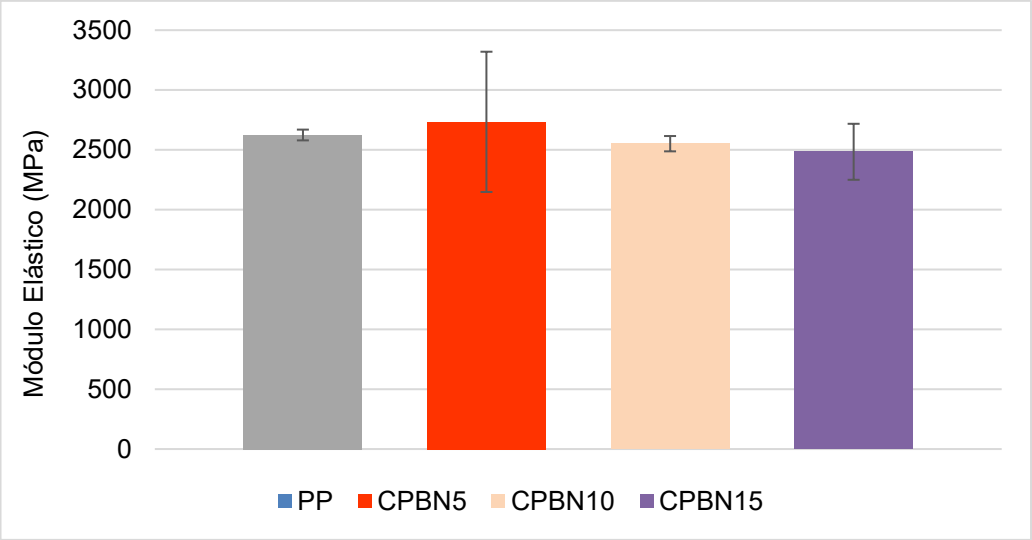
A Figura 24 apresenta os resultados do Módulo Elástico obtido nos ensaios de tração para a matriz pura e os compóstios de fibras não tratadas. A matriz de polipropileno apresentou um módulo de 2624,1 MPa, número ligeiramente inferior ao da amostra CPBN5 que foi de 2734,0 MPa. Os compósitos reforçados com 10 e 15% de fibras não tratadas, tiveram reduções de 2,7% e 5,6% no módulo elástico em relação ao polipropileno puro. A adição de fibras em um teor 5% causou um leve aumento da propriedade do material, tendência que não seguiu com teores maiores de fibras, já que para as amostras CPBN10 e CPBN15 oubservou-se a diminuição do módulo de elasticidade.

Os resultados obtidos na análise mecânica contrariam a literatura analisada, que mostram o aumento do número em função do teor de reforço. Brandão (2015) analisou compósitos de PP reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar,

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

aferindo que a adição de 5 e 10% de fibras "*in natura*" a matriz de PP aumentou o módulo de elasticidade em respectivamente 8,4 e 29,7%.

Figura 24 - Gráfico de comparação de módulo elástico para o Polipropileno puro e Compóstios reforçados com 5, 10 e 15% de fibras "*in natura*".



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

A Figura 25 apresenta os resultados do Módulo Elástico obtido nos ensaios de tração para a matriz pura e os compóstios de fibras tratadas. A adição de 5% de fibras ao polipropileno gerou uma diminuição de 18,2% no número em relação a matriz pura. A incorporação de 10% de fibras causou uma dimunuição de 11% no valor do módulo elástico. A amostra CPBT15, contendo a maior quantidade de reforço, obteve uma redução de 15,5% no módeulo elástico.

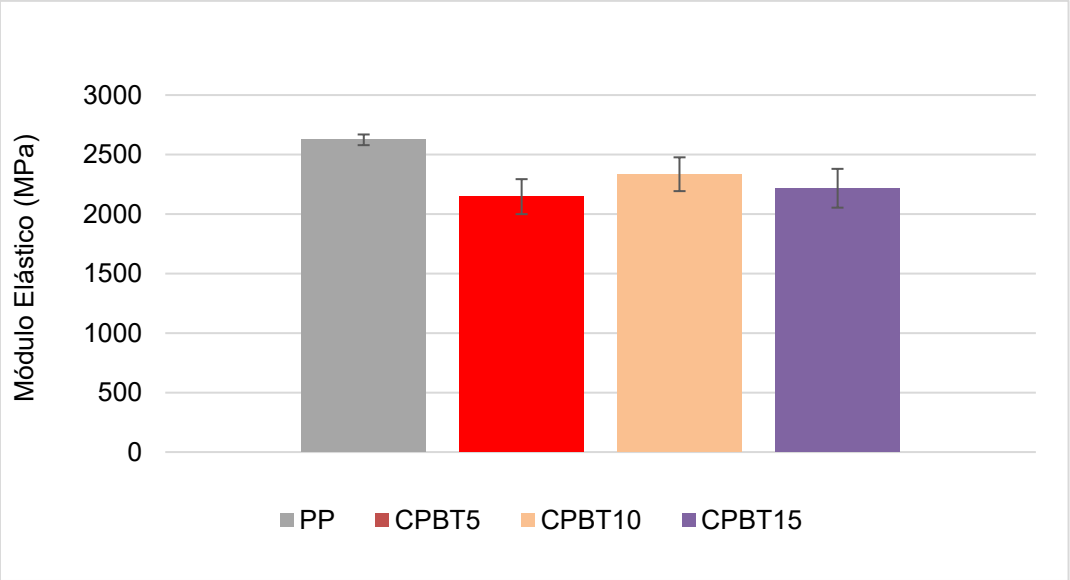
Todos os compósitos elaborados apresentaram diminuição do valor referente a matriz de polipropileno, resultados que não são compativeis com as expectativas e a literatura analisada, já que as fibras são naturalmente mais rígidas do que o PP puro. Paiva e Mulinari (2013) realizaram estudos sobre as propriedade mecânicas de compósitos de polipropileno reforçados com fibras do bagaço de cana-de-açúcar modificadas com mercerização, ele observou um aumento significativo do módulo elástico com o aumento do teor de fibras incorporadas a matriz, registrando um aumento de quase 70% no valor para um matriz reforçada com 30% de fibras.

Diversos fatores podem estar relacionados a piora das propriedades mecânicas com a adição das fibras na matriz, como a falta de adesão entre as fases que não permite a transmissão de tensões de forma ideal para o reforço e a falta de homogeneidade estrutural das fibras que faz com que suas propriedades variem. A

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

incorporação de fibras naturais sem um tratamento adequado a matrizes poliméricas aumenta os pontos de falha do material, contribuindo para a perda de resistência mecânica (Luz et al, 2006).

Figura 25 - Gráfico de comparação de módulo elástico para o Polipropileno puro e Compóstios reforçados com 5, 10 e 15% de fibras tratadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Apesar dos resultados de todas as análises mecânicas divergirem dos resultados esperados de acordo com a literatura, onde Paiva e Mulinari (2013) registraram um aumento próximo de 43% no módulo elástico para amostras de PP reforçadas com 10% fibras de cana-de-açúcar tratadas, o que poderia indicar a falta de efetividade dos tratamentos superficiais, os resultados obtidos nas análises térmicas, MEV e de FTIR apontam que os tratamentos de mercerização e de acetilação foram realizados com sucesso.

O desempenho mecânico abaixo do esperado para os compósitos pode ser atribuído ao tipo de processamento utilizado no trabalho, já que a moldagem por injeção realizada para a obtenção dos corpos de prova não permitia o controle ideal dos parametros do processo.

A Figura 26 mostra fotografias de alguns dos corpos de prova fraturados após a realização do ensaios de tração. É possível observar a presença de vazios no interior das peças, o que pode prejudicar as propriedades dos materiais.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Figura 26 - Corpos de prova fraturados dos compósitos após os ensaios mecânicos.

Fonte: Autor, 2025.

A falta de preenchimento total das amostras pode ser atribuída a baixa pressão aplicada durante a injeção, visto que a pressão foi aplicada de forma manual através de uma alavanca, ocasionando o preenchimento imperfeito das cavidades do molde, deixando espaços internos nos corpos de prova. A humidade presente nos compósitos durante o processamento pode ter prejudicado a estrutura dos corpos de prova, já que apesar do PP e as fibras terem sido secos quando obtidos, o tempo entre obtenção, armazenamento e processamento foi relativamente longo e pode ter sido suficiente para a absorção de água pelos componentes. Esses fatores podem ter ocasionado bolhas e defeitos nas amostras, gerando resultados com grandes desvios e incompátiveis com a literatura.

5.2.3 Análise térmica

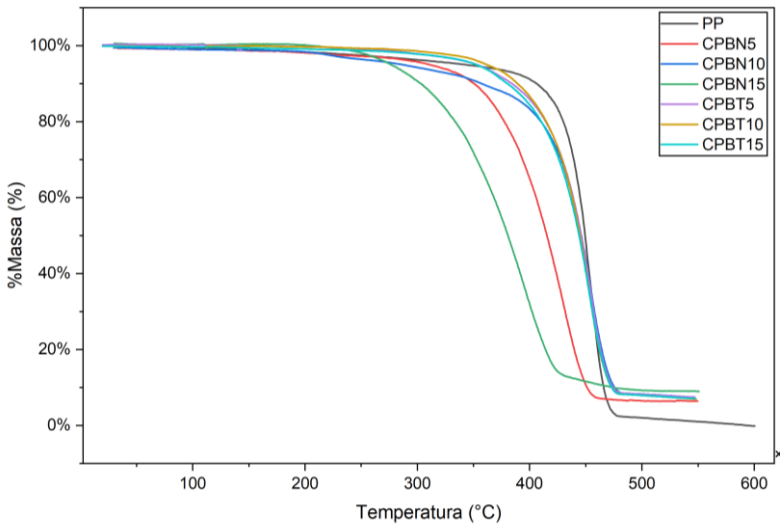
A Análise foi utilizada para avaliar a estabilidade térmica dos compósitos reforçados com fibras de bagaço de cana “*in natura*” e dos compóstios reforçados com fibras tratadas, a partir da análise foram obtidas curvas de TGA e DTG.

A Figura 27 apresenta as curvas de TGA para a matriz de PP e as 6 variações de compóstios desenvolvidos. Comparando-se as curvas dos compósitos com a do PP, observa-se que a adição de fibras não tratadas diminuiu significativamente a

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

estabilidade térmica da matriz.

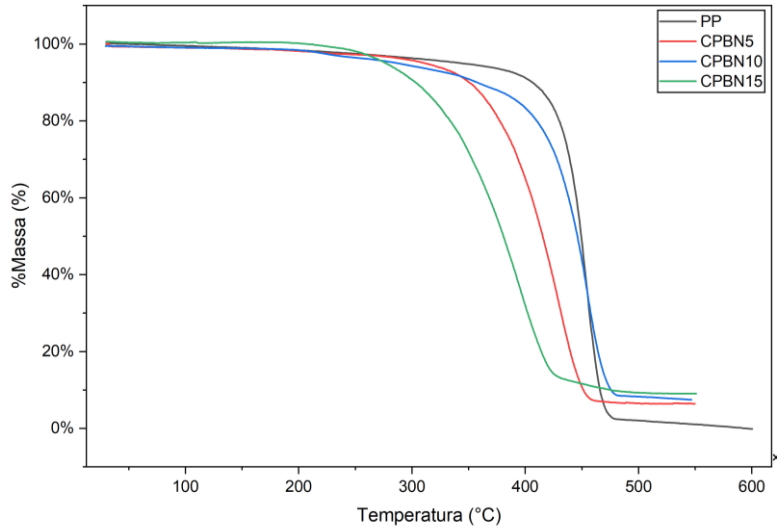
Figura 27 - Curvas de TGA para a matriz de PP e os compósitos com fibras "*in natura*" e modificadas.



Fonte: Autor, 2025.

A Figura 28 compara as curvas de TGA do polipropileno com os compósitos sem modificação nas fibras. É notável que a incorporação das fibras prejudicou o desempenho térmico do material, com a perda de massa se iniciando de forma mais acentuada em temperaturas menores, especialmente na amostra reforçada em 15%. A amostra CPBN10 se mostrou a mais estável sob solicitações térmicas entre as 3 analisadas, mesmo possuindo maior teor de reforço do que a amostra CPBN5.

Figura 28 - Curvas de TGA para a matriz de PP e os compósitos com fibras "in natura".



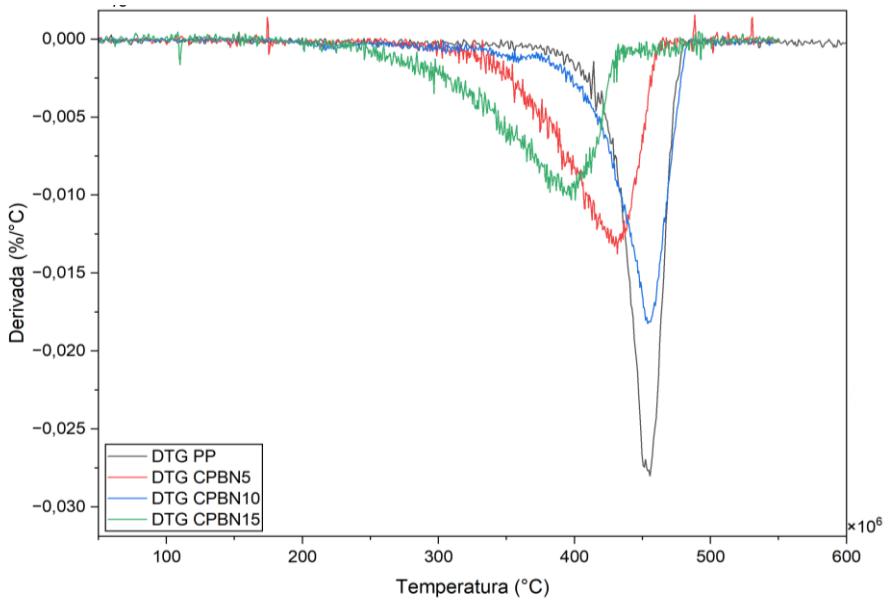
Fonte: Autor, 2025.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Na Figura 29 estão as curvas de DTG para o PP e compósitos sem modificação nas fibra, as amostras apresentam picos mais largos e menos intensos em comparação com a matriz pura.

A amostra CPBN15 possui um pico que se inicia em 240°C e atinge seu máximo em 400°C, essa degradação precoce do compósito está associada a quantidade de fibras incorporadas na matriz e a falta de compatibilidade entre as fases, já que as fibras sem tratamento apresentram um estágio de degradação na faixa de 223°C associado a decomposição de componentes amorfos e outro estágio associado a degradação da celulose a partir de 356°C. No compósito com 5% de reforço pode-se perceber um único pico a partir de 330°C, com ápice em 430°C, a diferença em relação a amostra reforçada com 15% se deve a menor concentração de fibras. Ambos os materiais apresentam picos únicos e redução drástica da temperatura de decomposição compósito em relação ao polipropileno puro, que apresentou pico de decomposição em 450°C. Já a amostra CPBN10 apresentou comportamento diferente das anteriores, com 2 picos na análise de DTG, o primeiro pico em 354°C é referente a a degradação das fibras e o segundo referente a degradação do PP.

Figura 29 - Curvas de DTG para a matriz de PP e os compósitos com fibras "*in natura*".

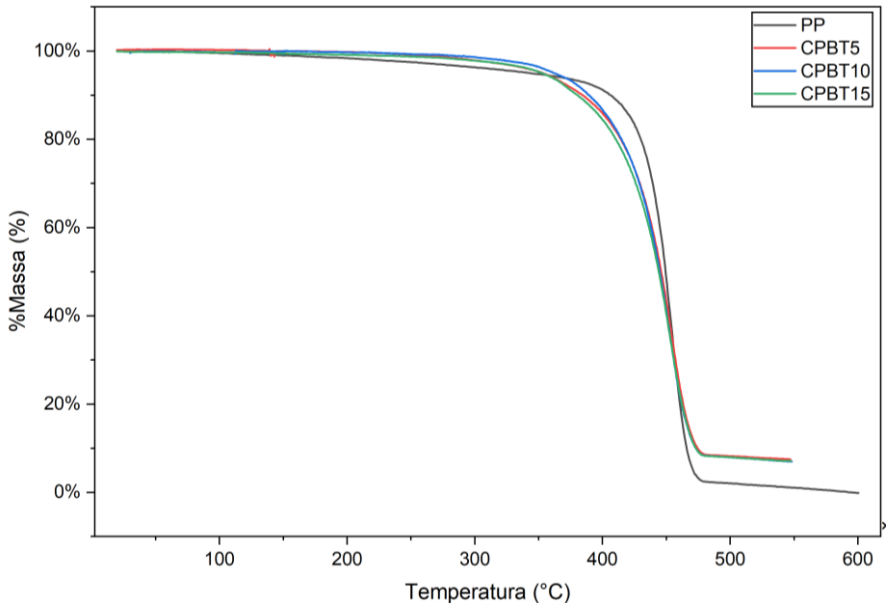


Fonte: Autor, 2025.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Os resultados da TGA para o polipropileno puro e os compósitos obtidos de fibras mercerizadas e acetiladas estão na Figura 30. As curvas de todas as amostras apresentam pouca diferença quanto ao teor de fibras incorporado e se mostram muito mais próximas da matriz do que os compósitos de fibras não tratadas.A manutenção das propriedades térmicas da matriz pelos compósitos CPBT5, CPBT10 e CPBT15 em comparação aos compósitos reforçados com fibras não tratadas se devem a melhor adesão com a matriz e maior estabilidade térmica das fibras proporcionadas pelo tratamento químico, evidenciadas pelas análises térmicas, morfológicas e de FTIR das fibras. Segundo Mulinari (2009) fibras de celulose do bagaço de cana-de-açúcar quando tratadas quimicamente adicionadas a uma matriz de polietileno de alta densidade em um teor menor do que 20%, tiveram boa interação com a matriz e mantiveram as propriedades térmicas do polietileno.

Figura 30 - Curvas de TGA para a matriz de PP e os compósitos com fibras tratadas.

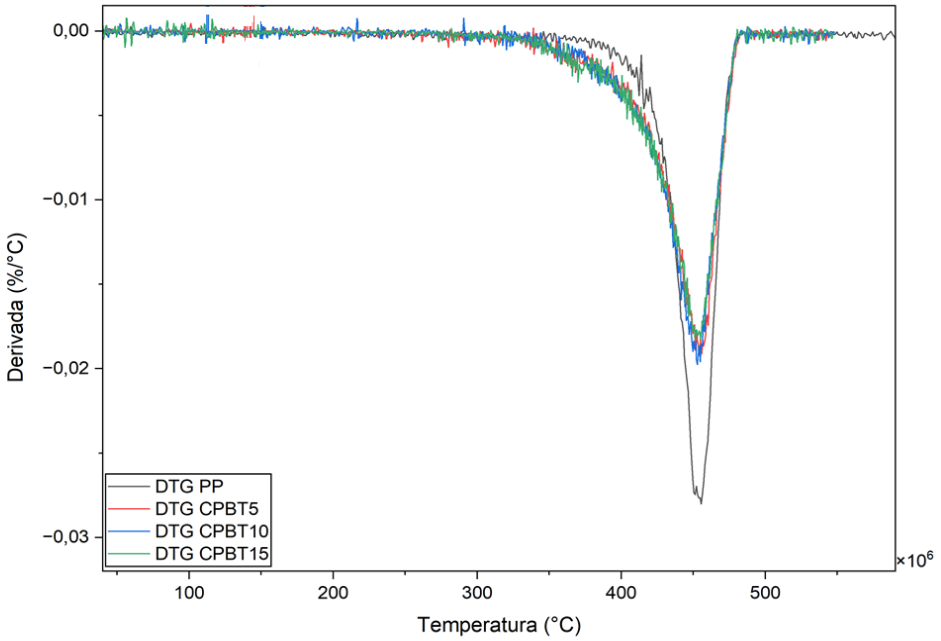


Fonte: Autor, 2025.

A Figura 31 apresenta as curvas de DTG para o PP puro e as amostras com fibras tratadas na composição. Todos os compósitos analisados apresentam pico unico de decomposição com ápice em cerca 450°C, semelhante a matriz polimérica pura.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

Figura 31 - Curvas de DTG para a matriz de PP e os compósitos com fibras tratadas.



Fonte: Autor, 2025.

A principal diferença entre os compósitos e a matriz é observada no ínicio da etapa de degradação, que se inicia em 335°C nos 3 compóstios, e apenas em 390°C para o PP. Sampaio (2019) encontrou picos bem definidos em diferentes temperaturas referentes a degradação das fibras e da matriz termoplástica e constatou a perca de estabilidade térmica em matrizes de Polietileno reforçadas com fibras de cana-de-açúcar com o aumento do teor de reforço no material. Essa degradação precoce está associada com a degradação das fibras no interior do material, com maior intensidade de pico na amostra CPBT15 devido a maior porcentagem de fibras incorporadas.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nas análises empregadas nas fibras brutas e tratadas comprovam que os tratamentos empregados neste trabalho promoveram mudanças significativas na estrutura e nas propriedades das fibras de bagaço de cana-de-açúcar.

A microscopia eletrônica de varredura evidenciou a mudança no aspecto superficial das fibras após o tratamento alcalino, elas se mostraram mais rugosas e apresentaram maior quantidade de “pits” visíveis. Também foi possível observar a mudança na superfície das fibras após a acetilação, com a rugosidade sendo ainda mais aparente, além do entrelaçamento delas após o procedimento.

As análises térmicas das fibras demonstraram que os tratamentos químicos removeram componentes amorfos indesejados, tornaram as fibras mais estáveis quando submetidas a temperaturas de até 250 °C, causaram mudanças nas etapas de degradação e reduziram significativamente sua absorção de humidade. higroscopicidade.

A análise de FTIR apontou mudanças na estrutura das fibras, com a diminuição da banda em 3360 cm^{-1}, característica para hidroxilas e o aumento significativo da banda em 1740 cm^{-1}, que denota a presença de carbonila de ésteres, provando que o procedimento foi bem sucedido.

As análises de FTIR e DSC para o PP reciclado apontam a presença de impurezas no material, o que pode ter modificado as propriedades do material e contribuído para resultados divergentes da literatura analisada.

As micrografias dos compósitos obtidos mostram que as fibras não tratadas não estavam bem integradas com a matriz, já que foi possível observar lacunas entre as fibras e o polímero. As imagens dos compósitos reforçados com fibras modificadas revelaram que a interação entre reforço e matriz foi melhorada, fato que pode ser observado pela diminuição dos espaços vazios nas interfaces e pela impregnação das fibras pelo polipropileno reciclado.

Os ensaios mecânicos demonstraram a piora na propriedade de resistência a tração dos compósitos para todos os teores de reforço quando comparados a matriz pura, tanto para as fibras “*in natura*” quanto para as fibras tratadas, indicando que o tratamento não foi suficiente para melhorar o desempenho do material sob tração. O

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

módulo de elasticidade apresentou pouca variação com a incorporação de fibras não tratadas, já para as amostras com fibras tratadas o módulo diminuiu com a incorporação de reforço na matriz, tornando os compósitos materiais mais dúcteis em relação ao polipropileno reciclado. Os resultados dos testes mecânicos podem ter sido prejudicados pelo método de processamento de injeção empregado, visto que os corpos de prova apresentaram falta de uniformidade no preenchimento de seu interior com a presença de vazios.

As análises térmicas dos compósitos demonstraram que as amostras reforçadas com fibras tratadas possuíam maior estabilidade térmica em relação aos materiais reforçados com fibras sem tratamento. Os compósitos apresentaram propriedades térmicas semelhantes a matriz pura em todos os teores analisados, demonstrando efetividade do tratamento das fibras para manter a estabilidade térmica do PP mesmo com a adição de cargas.

Em suma, os resultados comprovaram a efetividade do tratamento superficial nas fibras, melhorando sua estabilidade térmica e a adesão com a matriz, gerando compósitos com propriedades mecânicas e térmicas similares ao polipropileno puro, mas obtidos de forma sustentável, sem causar impactos ao meio ambiente.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Uso de uma injetora hidráulica na confecção dos corpos de prova para minimizar a heterogeneidade do material.
- Avaliação das propriedades dos compósitos para diferentes diâmetros de fibras.
- Realizar ensaios de flexão e de impacto para entender como os compósitos se comportam sob diferentes solicitações mecânicas.
- Testes de envelhecimento para aferir o quanto as fibras e os tratamento empregados podem contribuir para a vida útil do material.
- Realizar outros tratamentos superficiais nas fibras para avaliar a influência deles na interação das fibras com a matriz.

Realizar o trabalho com outras matrizes termoplásticas e outros tipos de ffibras naturais.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

REFERÊNCIAS

ABIPLAST – Associação brasileira da indústria do plástico. **Perfil 2023: indústria do plástico impulsiona economia brasileira gerando mais de 370 mil empregos**. Disponível em: https://www.abiplast.org.br/noticias/perfil-2023-industria-do-plastico-impulsiona-economia-brasileira-gerando-mais-de-370-mil-empregos/. Acesso em: 12 jun. 2025.

AGRAWAL, A. R.; PANDELIDIS, I. O.; PECHT, M. Injection-molding process control—A review. **Polymer Engineering & Science**, v. 27, p. 1345–1357, 2010.

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

ALBUQUERQUE, Y. S. de. **Estudo de compósitos de polietileno reciclado reforçado com fibra de bambu**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 51 f. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 638: Standard test method for tensile properties of plastics**. United States, 2008.

ARAÚJO, A.V.C.; HUBERT, H.M.K.; MARTINS, V.; et al. Reprocessamento do polietileno de alta densidade: aspectos estruturais. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS** – 2019. Bento Gonçalves, RS. Anais...15° Congresso Brasileiro de Polímeros (15 CBPOL), p. 4127-4131. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/266236.

BARUD, H. da S. **Preparo e caracterização de novos compósitos de celulose bacteriana.** 2006. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, 114f. 2006.

BORONAT, T. et al. Development of a biocomposite based on green polyethylene biopolymer and eggshell. **Materials & Design**, v. 68, p. 177-185, 2015.

BRANDÃO, A. T. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos de polipropileno reforçados com fibras do bagaço de cana-de-açúcar**. 2015. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 58 f.2015.

BRASKEM. **Utilidades domésticas PP e PE: Catálogo de produtos**. Disponível em: https://www.braskem.com.br/catalogo-de-produtos. Acesso em: 10 de jul. 2025.

CALLISTER, W.D.J. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos Polímeros**. 2. Ed. São Paulo: Artiiber Editora Ltda., 2006.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

CARVALHO NETO, A.G.V. et al. **Preparação e caracterização de compósitos de polietileno pós-consumo reforçados com fibras do bagaço de cana**. In: Anais do 10 Congresso Brasileiro de Polímeros, 2009.

COLONETTI, G.C.; FUCKNER, J.K.W.; NOGUEIRA, A.L. Influência do teor de argila nas propriedades do polipropileno e a reciclagem dos nanocompósitos obtidos por injeção. **Matéria** (Rio J.), v. 22, Suppl 1, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0267.

DA SILVA, I. L. A. **Propriedades e Estrutura de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Contínuas de Juta.** 2014. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências de Materiais), Campos dos Goytacazes: Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2014.

D'ALMEIDA, A. L. F. S. et al**.** Acetilação da Fibra de Bucha (Luffa cylindrica). **Polímeros: Ciência e Tecnologia,** vol. 15, n. 1, p. 59-62, 2005.

DE BLASIO, C. A. **Solução de defeitos na moldagem por injeção de termoplásticos**. 2007. Dissertação (Mestrado) na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 150 f. 2007.

DECKER, L. da C. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos reforçados com resíduo de erva-mate.** 2020. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade do Vale do Taquari – Univates. Lajeado, 2020.

DE PAULA, P. G. **Formulação e caracterização de compósitos com fibras vegetais e matriz termoplástica.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, 2011.

FERNANDES, A. C. et al. **Influência da "velocidade de injeção" e "tempo de recalque" nas características de peças injetadas em polipropileno**. In: 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 6., 2011, Caxias do Sul, 2011.

FLORINDO, D.N.F. **Obtenção de compósitos poliméricos com fibras naturais de bagaço de malte**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia Química, Departamento Acadêmico de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 50f. 2017.

FRAGA, A.N. et al. Relationship between water absorption and dielectric behaviour of natural fibre composite materials. **Polymer Testing, v.** 25, p. 181–187, 2006.

GANDARA, M. Et al. Compósitos de PET reciclado com fibra de cana-de-açúcar tratada por explosão a vapor. **Revista Matéria**, v. 22, n. 4, 2017.

ISHIZAKI, M. H. et al. Compósitos de polipropileno e fibras de coco verde: influência do teor de fibra e das condições de mistura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 16, n. 3, p. 182–186, 2006.

JAFELICE, D. A. **Caracterização de compósitos de polipropileno reciclado e**

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

fibra de coco. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Presbeteriana Mackenzie, São Paulo, 2020.

JÚNIOR, R. P. M. **Influência de cargas de reforço nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz polimérica**. 2017. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 48 f. 2017.

KOTIK, H. G. Fibras naturais e compósitos reforçados com fibras naturais: a motivação para sua pesquisa e desenvolvimento. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 24, n. 3, 2019.

LAGO, G.L. **Avaliação da qualidade do polipropileno pós-consumo provenientes de empresas de reciclagem**. 2022. Dissertação (Mestrado em em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, 2022, 103f. Disponível em: http://hdl.handle.net/10183/253002.

LAPIQUE, F.; REDFORD, K. Curing Effects on Viscosity and Mechanical Properties of a Commercial Epoxy Resin Adhesive. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, v.22, pp. 337-346, 2002.

LAZARINI, R.G. **Pré-tratamento de fibras de bagaço de cana-de-açúcar e seu uso em altos teores em compósitos com polipropileno via mistura termocinética**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

LE TROEDEC, M. et al. Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres. ***Composites Part A: Applied Science and Manufacturing***, v. 39, n. 3, p. 514-522, 2008.

LOPES, A. R**. Caracterização de soluções poliméricas para aplicação em revestimentos para a conservação de produtos alimentares**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) - Departamento de Química da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra. Coimbra, 2016.

LUZ, S.M. da; GONÇALVES, A.R.; DEL'ARCO JUNIOR, A.P. Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Compósitos de Polipropileno Reforçado com Celulose de Bagaço e Palha de Cana. **Matéria** (Rio J.), v. 11, n. 2, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1517-70762006000200004.

MAIA, T. H. S. **Compósitos e nanocompósitos de polietileno-celulose: efeito do tamanho e da composição da fibra e do processamento nas propriedades óticas e mecânicas dos filmes.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2017.

MULINARI, D. R. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose do bagaço de cana de açúcar**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

NAKATANI, H.; OHSHIMA, Y.; UCHIYAMA, T.; et al. Degradation and fragmentation behavior of polypropylene and polystyrene in water. **Sci Rep**., v.12, n.1, p. 8501, 2022. Disponível em: https://doi: https://doi.org/10.1038/s41598-022-23435-y.

NASCIMENTO, B. C. M. **Polipropileno verde a partir do glicerol: estudo de mercado e instalação de uma planta no Brasil**. Rio de Janeiro, 2019.

NOHARA, L.B. et al. Otimização da interface/interfase de compósitos termoplásticos de fibra de carbono/PPS pelo uso do poli(ácido âmico) do tipo BTDA/DDS. **Polímeros** [online]. 2007, v. 17, n. 3, p. 180-187. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0104-14282007000300005. Acesso em: 02 de dez. 2022.

OLIVEIRA, J.P.M. **Compatibilização de compósitos de PEBD reforçados com o bagaço da cana-de-açúcar**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 41f. 2019.

OLIVEIRA, O. C. de. **Avaliação de fibras de bagaço de cana-de-açúcar in natura e modificada para aplicação em compósitos**. 2018. 102 f Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 102f. 2018.

OLIVEIRA, R.V.B. de. **Modificação de superfícies de polipropileno para obtenção de molhabilidade foto-reversível**. 2013. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 213. 57f. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/102024?show=full.

OSSWALD, T. A.; MENGES, G. **Materials science of polymers for engineers**. 3rd ed. Cincinnati: Hanser, 2012.

PAIVA, R.L. de M.; MULINARI, D.R. Avaliação do envelhecimento ambiental e das propriedades mecânicas dos compósitos de polipropileno/bagaço de cana-de-açúcar. **Cadernos UniFOA**, Edição Especial do Curso de Mestrado Profissional em Materiais, Volta Redonda: Centro Universitário de Volta Redonda, p. 19-28, jun. 2013.

REICHERT, A. A. **Influência da modificação química de fibras vegetais em compósitos sustentáveis de polipropileno reciclado**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.2018.

POTT, C.M.; ESTRELA, C.C. Histórico ambiental: desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento. **Estudos Avançados**, v. 31, n. 89, p. 271–283, 2017.

ROSÁRIO, F. et al. Resíduos de sisal como reforço em compósitos de polipropileno virgem e reciclado. **Polímeros**, v. 21, p. 90-97, 2011.

ROSATO, D. V.; ROSATO, M. G. **Injection molding handbook**. 3. ed. New York: Springer, 2004.

SAMPAIO, M.S. **Obtenção e caracterização de compósitos de polietileno com**

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54

fibras naturais. 2019. Projeto de Final de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SANCHEZ, E.M.S.; CAVANI, C.S.; LEAL, C.V.; et al. Compósito de Resina de Poliéster Insaturado com Bagaço de Cana de Açúcar: Influência do Tratamento das Fibras nas Propriedades. **Polímeros**, vol. 20, nº 3, p. 194-200, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0104-14282010005000034.

SANTOS, EMILSON R. DOS; BASTOS, DANIELE C.; PEREIRA, PATRICIA S. DA C**. Avaliação de compósitos de polietileno de alta densidade com fibras de cana-de-açúcar modificadas**. In: Congresso brasileiro de polímeros, 12., 2013, Florianópolis, 2013.

SEM AUTOR. **[Injetora de plástico manual]**. [Fotografia]. s.l.: s.n., s.d. Disponível em: <https://yata-apix-0a5e95e3-857b-498d-b80a-b1381d42f7cf.s3-object.locaweb.com.br/e83a9e28ef374b279d8f432561adc153.jpg>. Acesso em: 3 jul. 2025.

SILVA, F.A. da; RABELO, D. O Uso Sustentável de Polímeros. **Revista Processos Químicos**, v. 11, n. 21), p. 9-16, 2017.

SOBRINHO, L.L. **Desenvolvimento de matriz polimérica para material compósito visando o reforço de dutos de aço**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 137f. 2005.

TITA, S.P.S.; PAIVA, J.M.F. de; FROLLINI, E. Resistência ao Impacto e Outras Propriedades de Compósitos Lignocelulósicos: Matrizes Termofixas Fenólicas Reforçadas com Fibras de Bagaço de Cana-de-açúcar. **Polímeros** [online], v. 12, n. 4, p. 228-239, 2002.

VENCESLAU, H. M. B. de B. **Diversificação das Aplicações do Bagaço de Cana de Açúcar.** João Pessoa, 2018. Monografia (Graduação em Tecnologia em Produção Sucroalcooleira) – Universidade Federal da Paraíba, 2018.

VIEIRA, K. **Síntese e caracterização de um compósito polimérico biodegradável utilizando poli (ácido lático) e borra de café**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) - Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/226884.

ZANCHET, A. et al. Activator from sugar cane as a green alternative to conventional vulcanization aditives. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 437-446, 2018.

ZANINI, N. C. et al. Influência do tratamento alcalino das fibras no comportamento térmico dos compósitos de PP reforçados com fibras da palmeira real australiana. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – cbecimat**, 23. Foz do Iguaçu, 2018.

Versão Final Homologada
29/08/2025 13:54