



Obtenção e caracterização de compósitos de polipropileno reforçados com bagaço de cana-de-açúcar

Yuri Gomes de Souza

Projeto de Final de Curso

Orientadora

Prof.^a Carla Reis de Araújo, D.Sc.

Dezembro de 2021

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE POLIPROPILENO REFORÇADOS COM BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Yuri Gomes de Souza

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado por:

Ladimir José De Carvalho, D.Sc

Michel Serra Sampaio, Eng. Quím.

Orientado por:

Carla Reis de Araújo, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Dezembro de 2021

Ficha Catalográfica

Souza, Yuri Gomes.

Obtenção e caracterização de compósitos de polipropileno reforçados com bagaço de cana-de-açúcar / Yuri Gomes de Souza. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2021

xii, 65 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2021.

Orientadora: Carla Reis de Araújo

1. Compósitos. 2. Polipropileno. 3. Caracterização. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/ EQ). 5. Carla Reis de Araújo I. Título

**“O passado é história, o futuro é mistério, mas o hoje é uma dádiva, por
isso é chamado de presente!”**

Provérbio chinês – Autor desconhecido

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus e à minha família, principalmente a minha mãe Márcia Cristina, que sempre acreditou em mim, me apoiou e me incentivou durante toda minha graduação, sonhando com esse momento de conclusão, além é claro de todo amor, carinho e compreensão, nos momentos difíceis. Obrigado pelo amor incondicional.

A minha orientadora, Professora Carla Reis, pela dedicação, carinho, incentivo e suporte ao longo, não só do projeto, mas de toda a graduação. À professora Carla, pela oportunidade e orientação desde o início da graduação até a conclusão deste projeto, se mostrando sempre disponível para me auxiliar e orientar. Obrigado pela confiança.

A todos os meus amigos, que me ajudaram nos bons e maus momentos da graduação, em especial Raphael Limoeiro e Sissa Lorryne, amigos desde o primeiro período, fazendo parte de toda a trajetória seja estudando junto, tirando dúvidas ou ouvindo e apoiando nos momentos difíceis. Obrigado por terem feito a jornada ser menos árdua.

A professora Cheila G. Mothé (*in memoriam*) e ao Laboratório de Análise Térmica Prof Ivo Giolito, DPO-EQ/UFRJ pela realização análises de TG, DTG e DTA.

Aos funcionários do Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano - IMA, em especial a Viviane, o Alan e o Bruno, por sempre serem muito solícitos e gentis comigo durante a realização das misturas e ensaio mecânico.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE POLIPROPILENO REFORÇADOS COM BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Yuri Gomes de Souza

Dezembro, 2021

Orientadora: Profa. Carla Reis de Araújo, D.Sc.

O desenvolvimento de materiais ecologicamente corretos torna-se cada vez mais necessário, uma vez que o impacto ambiental causado pelo homem pode trazer danos irreparáveis ao planeta. Uma importante ferramenta para minimizar esse impacto é a busca por novas tecnologias, dado a necessidade de adaptação que enfrentaremos em um futuro não muito distante. Neste contexto, a produção de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais se mostra como uma alternativa interessante para a redução no consumo matéria-prima não renovável. A atratividade das fibras naturais é devido a disponibilidade em grandes quantidades e com baixo custo, além disso, as fibras naturais possuem maior resistência a tração, do que o polímero puro e, portanto, são uma boa alternativa para reforço em compósitos. A matriz polimérica e a fibra natural unem-se em sinergia conferindo propriedades únicas ao material desenvolvido. O objetivo deste trabalho foi a obtenção de compósitos de polipropileno reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar e a caracterização de suas propriedades através de análise térmica e ensaios mecânicos. Os resultados da análise térmica mostraram que a degradação das fibras naturais ocorre em temperatura de aproximadamente 200°C e o polímero se degrada por volta dos 450°C, o que permite a obtenção do compósito sem degradar seus constituintes. Os resultados dos ensaios mecânicos mostraram a diminuição da tensão na força máxima, da tensão na ruptura e da deformação na ruptura com a adição de fibra, e o aumento do módulo de elasticidade. Além disso, no geral, os compósitos obtidos com fibras de tamanhos menores apresentaram melhor resistência a tração do que os obtidos com fibras maiores. A utilização de 1% de compatibilizante não apresentou mudanças significativas no ensaio mecânico.

ÍNDICE

Capítulo 1 – Introdução	1
Capítulo 2 – Objetivos	4
2.1 – Objetivos gerais.....	4
2.2 – Objetivos específicos.....	4
Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica	5
3.1 – Polipropileno.....	5
3.1.1. Síntese do polipropileno.....	6
3.1.2. Estrutura e propriedades do polipropileno.....	8
3.1.3. Polipropileno e o meio ambiente	9
3.1.4. Mercado do polipropileno.....	10
3.2 – Bagaço de cana-de-açúcar.....	11
3.2.1. Composição da cana de açúcar.....	13
3.2.2. Mercado de cana de açúcar.....	14
3.2.3. Destino do bagaço de cana-de-açúcar.....	15
3.3 – Materiais compósitos.....	16
3.3.1. Interface entre a fibra e a matriz polimérica.....	18
3.3.2. Propriedades dos compósitos.....	19
3.4 – Análise térmica.....	22
3.4.1. Termogravimetria (TG).....	22
3.4.2. Termogravimetria Derivada (DTG).....	22
3.4.3. Análise térmica diferencial (DTA).....	22
3.5 – Ensaio Mecânico.....	23
3.5.1 – Resistência à Tração.....	24
3.5.2 – Módulo de Elasticidade.....	25
3.5.3 – Deformação na Ruptura.....	25
Capítulo 4 – Metodologia	26
4.1 – Materiais.....	26
4.2 – Reagentes.....	26
4.3 – Equipamentos.....	27
4.4. – Métodos.....	27
4.4.1 – Preparo das fibras.....	27
4.4.2 – Obtenção dos compósitos.....	28
4.4.3 – Obtenção dos corpos de prova.....	30
4.4.5 – Análise térmica.....	31
4.4.6 – Ensaio Mecânico.....	32
Capítulo 5 – Resultados e discussão	34
5.1 – Caracterização térmica.....	34
5.2 – Ensaio Mecânico.....	38
Capítulo 6 – Conclusões	46
Capítulo 7 – Sugestões para trabalhos futuros	49
Referências Bibliográficas	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01 – Reação de poliadição do propeno.....	06
Figura 02 – Diagrama simplificado do processo Spheripol.....	07
Figura 03 – Estereoisômeros (a) isotático, (b) sindiotático e (c) atático.....	09
Figura 04 – Diagrama de blocos do processo Braskem de produção de polipropileno verde.....	10
Figura 05 – Principais resinas plásticas consumidas no Brasil 2019.....	11
Figura 06 – Produção de cana-de-açúcar por países produtores em 2019.....	12
Figura 07 – Cana-de-açúcar.....	12
Figura 08 – Bagaço de cana-de-açúcar.....	13
Figura 09 – Comparativo de produtividade de cana-de-açúcar por região.....	15
Figura 10 - Polipropileno (PP) em forma de grânulos.....	26
Figura 11 – Bagaço de cana-de-açúcar moído, peneirado e tratado com solução aquosa de NaOH 5% (m/v).....	28
Figura 12 – Misturador Haake.....	29
Figura 13 – Prensa hidráulica de bancada (à esquerda) e Molde para corpos de prova ASTM D638 (à direita).....	30
Figura 14 – Corpos de prova obtidos para o Compósito 5% Fibra + 1% de compatibilizante.....	31
Figura 15 – Dinamômetro EMIC	32
Figura 16 – Curvas TG (verde), DTG (azul) e DTA (vermelha) para o bagaço de cana-de-açúcar.....	34
Figura 17 – Curvas TG (verde), DTG (azul) e DTA (vermelha) para o polipropileno puro.....	34
Figura 18 – Curvas TG (verde), DTG (azul) e DTA (vermelha) para o Compósito com 5% de bagaço de cana-de-açúcar.....	35
Figura 19 – Curvas TG (verde), DTG (azul) e DTA (vermelha) para o Compósito com 10% de bagaço de cana-de-açúcar.....	36
Figura 20 – Curvas TG (verde), DTG (azul) e DTA (vermelha) para o Compósito com	

20% de bagaço de cana-de-açúcar.....	38
Figura 21 – Ensaio mecânico para o PP Puro e os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço de cana-de-açúcar retido em peneira de MESH 20 sem compatibilizante.....	40
Figura 22 – Compósitos de 5,10 e 20% de fibra após o rompimento no ensaio de Tração.....	40
Figura 23 – Polipropileno comercial puro após o ensaio de Tração.....	40
Figura 24 – Ensaio mecânico para o PP Puro e os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço de cana-de-açúcar retido em peneira de MESH 14 sem compatibilizante.....	41
Figura 25 – Ensaio mecânico para o PP Puro e os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço de cana-de-açúcar retido em peneira de MESH 20 com 1% de compatibilizante.....	42
Figura 26 – Ensaio mecânico para o PP Puro e os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço de cana-de-açúcar retido em peneira de MESH 14 com 1% de compatibilizante.....	43
Figura 27 – Comparação entre os valores de Módulo de Young para os compósitos obtidos com fibra retida nas peneiras de MESH 20 e 14, sem agente compatibilizante e com 1% compatibilizante para as proporções de 5, 10 e 20% de fibras e o polipropileno puro.....	46

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 01 – Proporção de polipropileno, bagaço de cana-de-açúcar e agente compatibilizante dos compósitos obtidos.....	30
Tabela 02 – Resultados das análises de TG, DTG e DTA para as amostras de PP puro, bagaço de cana-de-açúcar e de compósitos de PP com bagaço de cana-de-açúcar nas proporções de 5, 10 e 20% de fibra.....	38
Tabela 03 – Ensaio Mecânico dos compósitos obtidos.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Símbolo	Descrição
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DTA	Análise Térmica Diferencial
DTG	Termogravimetria Derivada
EPS	Poliestireno expandido
EVA	Etileno vinil-acetato
iPP	Polipropileno isotático
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PELBD	Polietileno Linear de Baixa Densidade
PET	Politereftalato de etileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de vinila
TG	Termogravimetria
T _m	Temperatura de fusão (<i>melting</i>)
NaOH	Hidróxido de Sódio

1. Introdução

O desenvolvimento de novos materiais que causem menos danos ao meio ambiente e a adequação de seus processos têm sido alvo de intensas pesquisas e estudos nos últimos anos. As fibras naturais têm se destacado como reforço em materiais compósitos de matrizes poliméricas, por serem provenientes de fontes de recursos renováveis, visando assim reduzir a dependência de materiais cujas fontes não são renováveis. Além disso, as fibras naturais possuem vantagens incluindo sua origem natural, são biodegradáveis, não tóxicas, são leves e possuem baixo custo (BARTOS et al, 2020). Os materiais compósitos reforçados com fibras naturais possuem diversas aplicações como; utilidades domésticas, peças de automóveis, componentes aeroespaciais, pisos e materiais balísticos (AISYAH et al, 2021).

O polipropileno (PP), polímero do propeno, é uma resina termoplástica pertencente ao grupo das poliolefinas. É um plástico similar ao polietileno, porém cada unidade da cadeia possui um grupo metil ligado. Apresenta uma ampla faixa de propriedades, como boa resistência química, além do seu baixo custo e facilidade de processabilidade (GOSCH et al, 2018). Em 2020 e 2019, o PP foi o plástico mais consumido, segundo dados da ABIPLAST, correspondendo a 20,1% e 21,0%, respectivamente, do consumo de plásticos no Brasil. Estas características têm permitido o crescimento contínuo do consumo deste material. Dentre as variedades do polipropileno estão, em relação ao tipo de formação, existem os homopolímeros, formados pelo mesmo tipo de monômero e os copolímeros, formados por monômeros diferentes. Além disso, quanto a taticidade, o polipropileno pode ser isotático, sindiotático e atático (SILVA, 2019).

O bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é um resíduo fibroso produzido no processo de moagem da cana-de-açúcar. Esse insumo é um resíduo gerado pela indústria sucroalcooleira, portanto disponível em grande quantidade e se destaca pela sua abundância e suas propriedades. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo; em 2019 a produção chegou a 753 milhões de toneladas, que significa 39% da produção mundial. A produção total de cana-de-açúcar no mundo totalizou 1.9 bilhões de toneladas, em 2019. Considerando-se que em média para cada tonelada de cana-de-açúcar são gerados, em torno de, 270 kg de bagaço, no ano de 2019 a safra mundial produziu cerca de 526 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar. Portanto, é necessário encontrar aplicações para essa

matéria-prima que possui alta disponibilidade, especialmente nos países onde a produção é extensa, como é o caso do Brasil. O bagaço de cana-de-açúcar possui propriedades físico-químicas atraentes como: alto teor de celulose e constituintes voláteis, o que indica alto potencial de geração de combustíveis líquidos, além de possuir baixo teor de cinzas e enxofre, que são constituintes indesejáveis que causam problemas nos processos e problemas ambientais. Este resíduo agrícola é queimado em caldeiras para geração de energia, mas ainda é subutilizado pela grande quantidade disponível, portanto há necessidade do desenvolvimento de tecnologias mais eficientes de processamento do bagaço (MIRANDA et al, 2021).

O termo compósito é definido como o material obtido com diferentes componentes, cuja combinação proporciona características favoráveis que, isoladamente, nenhum componente possui. Por se tratar de materiais heterogêneos, compósitos apresentam suas propriedades de acordo com a proporção dos componentes e de suas características (MARTINS, 2002).

As propriedades dos compósitos poliméricos, reforçados com fibras naturais, dependem de diversos fatores como: adesão fibra/matriz polimérica, volume de fração de fibra, orientação da fibra e matriz usada. A incorporação de fibras naturais rígidas em matrizes poliméricas flexíveis proporciona a obtenção de um novo material que pode ter melhores propriedades quando comparado ao polímero puro (KARIMAH, 2019). Esses compósitos podem ser caracterizados e avaliados por meio de várias técnicas específicas como; ensaios mecânicos, análise térmica, ressonância magnética nuclear e espectroscopia na região do infravermelho (GOSCH et al, 2018).

Os principais problemas associados ao uso das fibras em matrizes poliméricas estão relacionados à sua higroscopicidade e incompatibilidade com algumas matrizes. As fibras naturais são altamente polares, devido à presença de grupos hidroxila e, portanto, apresentam baixa afinidade química com polímeros de características pouco polares. O uso de agentes de acoplamento como compatibilizante entre a matriz e o reforço usado, pode trazer benefícios em relação à melhoria de propriedades mecânicas e térmicas (ARRAKHIZ, 2012).

A análise térmica é uma importante técnica analítica utilizada para melhor compreensão da relação entre estrutura e propriedade, pois permite medir mudanças de uma propriedade física ou química de uma substância ou material em função da temperatura ou tempo. Além disso, é possível avaliar a estabilidade

térmica de polímeros e compósitos, e seus estágios de decomposição (MOTHÉ & ARAUJO, 2002).

As propriedades mecânicas dos polímeros são caracterizadas pelo modo com que esses materiais respondem às solicitações mecânicas aplicadas, podendo as mesmas, serem do tipo tensões ou deformações (CANEVAROLO, 2002). Estudos, a respeito das propriedades mecânicas, de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais, têm sido realizados por muitos autores, devido a importância de sua caracterização para as aplicações para os materiais desenvolvidos.

Os ensaios mecânicos avaliam as propriedades mecânicas do material quando o mesmo é submetido a uma tensão mecânica. Através do ensaio de Tração podemos obter informações como a resistência do material à tração, o seu alongamento, módulo de elasticidade, entre outros (ARAÚJO, 2003). A avaliação de propriedades como resistência à tração, deformação na ruptura e Módulo de Young dos compósitos, são afetadas pelas propriedades individuais de seus constituintes. Fatores como concentração, tratamento químico, comprimento e orientação das fibras possuem grande influência nas propriedades dos compósitos. No geral, as propriedades de materiais compósitos são determinadas por quatro fatores, pelas propriedades dos componentes, pela composição, pela estrutura e pela interação interfacial entre reforço e matriz (ANGGONO, 2019).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Este trabalho teve como objetivo geral a obtenção e a caracterização de compósitos de polipropileno reforçados com fibras naturais de bagaço de cana-de-açúcar.

2.2 Objetivos específicos

- Obter materiais compósitos de polipropileno reforçados com fibras naturais de bagaço de cana-de-açúcar;
- Caracterizar os compósitos obtidos por análise térmica e ensaio mecânico de tração;
- Avaliar os compósitos por suas propriedades térmicas e mecânicas;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Polipropileno

O polipropileno (PP) é um dos plásticos mais simples e mais importantes da atualidade, devido a sua larga utilização nas indústrias automobilísticas, de eletrodomésticos, de embalagens para alimentos, brinquedos, embalagens de produtos e por ser um plástico com propriedades como: alto desempenho, baixo custo, pouco consumo de energia, além de ser um termoplástico reciclável (CAMPOS, 2016). O PP é representado pela fórmula molecular $(C_3H_6)_n$, e classificado como uma poliolefina, ou seja, formado por olefinas, que são hidrocarbonetos monoinsaturados alifáticos. O monômero usado para produção de polipropileno é o propeno ou propileno. O propeno é representado pela fórmula estrutural $(CH_2=CH-CH_3)$ e foi sintetizado pela primeira vez em 1951 por dois químicos dos EUA, Paul Hogan e Robert Banks, que transformaram eteno e propeno em sólidos brancos na tentativa de converter essas substâncias em componentes para a gasolina (PORRI, 2009). Porém, a descoberta do polipropileno é creditada à Giulio Natta (1954, Itália) utilizando o sistema catalítico desenvolvido por Ziegler, inicialmente a base de $TiCl_4/Al(C_2H_5)_3$ e posteriormente CrO_3 . Natta sintetizou o polipropileno isotático e cristalino que impulsionou os estudos sobre sistemas catalíticos estereoespecíficos e a produção em larga escala do polipropileno isotático na empresa química Montecatini a partir de 1957 (PORRI, 2009).

Quanto às propriedades mecânicas, o PP pode ser classificado como termoplástico, que são polímeros que podem ser fundidos e moldado diversas vezes, ou dissolvidos em solventes, o que viabiliza a reciclagem. Os polímeros termoplásticos amolecem sob efeito de temperatura e pressão, tomando a forma do molde e quando há nova alteração de temperatura e pressão esse processo é reiniciado (OLIVEIRA, 2018). Os polímeros termoplásticos são formados por macromoléculas que não reticulam entre si, ou seja, não formam ligações cruzadas com as cadeias vizinhas, ao contrário dos polímeros termorrígidos (THOMAS; POTHAN, 2009).

Algumas características comuns inerentes as poliolefinas é que são não-polares, não porosas e possuem superfície de baixa energia, não receptivas a tintas. As duas poliolefinas mais simples e importantes são o polietileno (PE) e o polipropileno

(PP), que juntas são responsáveis por grande parte das resinas vendidas nos EUA e no mundo (GOOCH, 2007).

Resistência química, baixa densidade, baixos custos de matéria prima e fabricação e propriedades como rigidez e tenacidade, conferem aos termoplásticos aplicações importantes na engenharia (OLIVEIRA, 2018).

3.1.1 Síntese do polipropileno

A síntese do polipropileno envolve uma reação de polimerização por adição do propeno, com a utilização de catalisador e sob condições de temperatura e pressão controladas. Como mostra a Figura 01, o processo predominante para a produção de propeno é o craqueamento térmico da nafta. A desidrogenação do propano e a recuperação do gás de refinaria também são alternativas. O propeno, utilizado para a produção de PP, deve ter alto grau de pureza (superior a 95%). A reatividade do propeno é análoga a do eteno, sendo atribuída principalmente à instauração que promove a formação de reações de adição. (ARAUJO, 2003).

O mecanismo de polimerização utilizado é o de coordenação, que utiliza catalisadores complexos com metais de transição, como os catalisadores Ziegler-Natta, que controlam a posição do grupo metila na cadeia polimérica de forma coordenada. Neste tipo de polimerização, o início do crescimento da cadeia polimérica está ligado ao metal de transição do catalisador de forma coordenada. (CALLISTER, 2019).

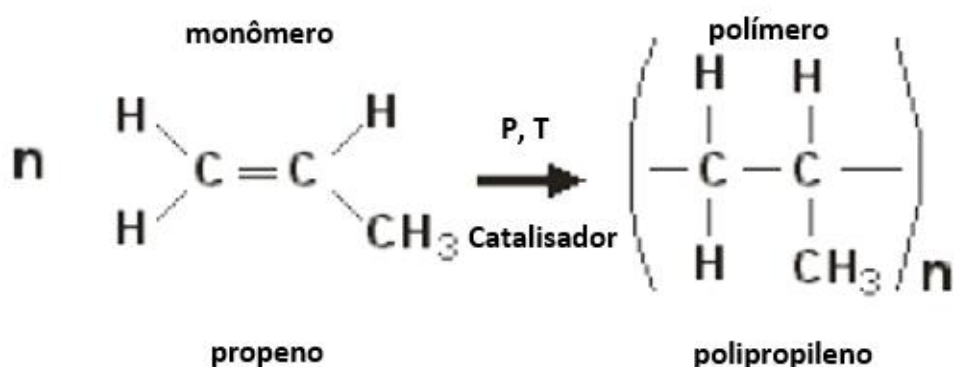


Figura 01 - Reação de poliadição do propeno.

Os processos de produção do polipropileno industrial utilizam sistemas de reatores de fase gasosa ou em massa. Nos reatores de fase gasosa, o polímero é

formado em torno de partículas de catalisador heterogêneo. A polimerização em fase gasosa é realizada preferencialmente num reator de leito fluidizado, onde o propeno percorre o leito contendo o catalisador heterogêneo (sólido) e o polímero formado é separado como um pó fino e depois convertido em pellets, forma que é vendido comercialmente. O gás que não reagiu é reciclado por uma corrente retornando ao reator (PETRY, 2011).

Na polimerização em massa, o propeno líquido atua como um solvente para evitar a precipitação do polímero. A polimerização prossegue sob as condições de temperatura entre 60 a 80°C e pressão 30-40 atm para manter o propeno no estado líquido. Para a polimerização em massa, reatores loop são empregados. A Figura 02 ilustra o diagrama do processo Spheripol para produção industrial de polipropileno que envolve a polimerização em massa em meio líquido e a copolimerização em leito fluidizado (PETRY, 2011).

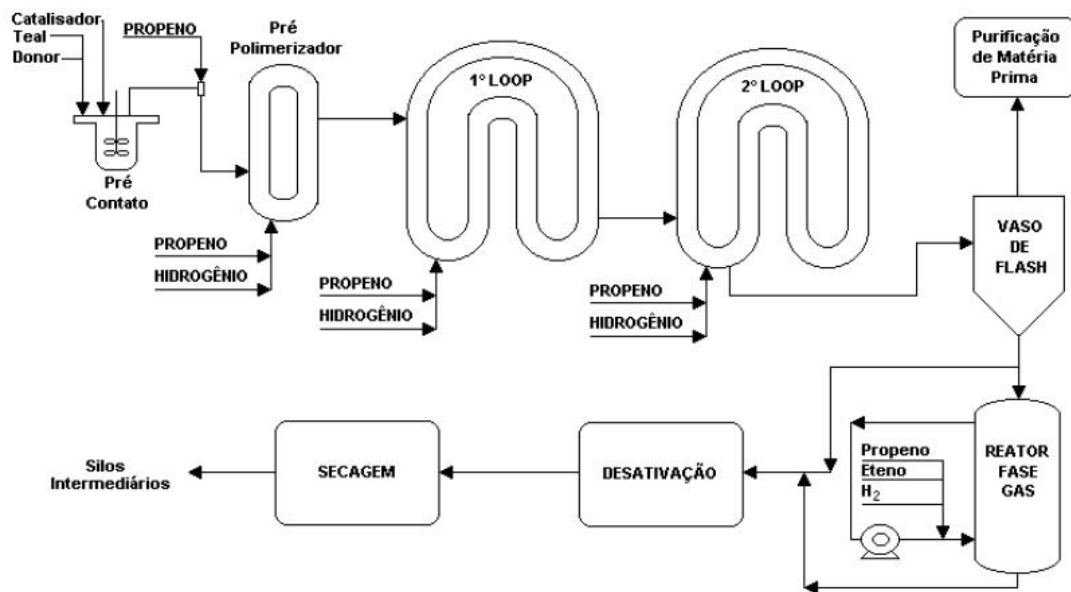


Figura 02 - Diagrama simplificado do processo Spheripol

Fonte: Petry, 2011

O processo de polimerização inicia-se com a mistura dos componentes do sistema catalítico em um vaso de pré-contato e subsequente pré-polimerização para ativação dele. Na etapa seguinte, a descarga do vaso de pré-polimerização é executada por diferença de pressão para o primeiro reator de polimerização (loop). Do primeiro reator loop, o polímero suspenso em propeno líquido (monômero) é continuamente transferido ao segundo reator loop. Uma mistura de propeno fresco e propeno reciclado proveniente do vaso de estocagem é dividida em dois fluxos

controlados separadamente alimentando o primeiro e o segundo reator loop. Em cada fluxo de propeno é introduzido hidrogênio na proporção necessária para obter o índice de fluidez desejado, ou seja, para controlar o peso molecular (PETRY, 2011).

As partículas de polímero são descarregadas do segundo reator suspensas em propeno líquido, além de propano e hidrogênio, sendo então conduzidas para um ciclone por meio de uma linha aquecida, onde ocorre a vaporização (flash) dos monômeros não reagidos por aquecimento e subsequente queda de pressão. Nesse ciclone, o propeno vapor é separado para ser recuperado e a fase mais densa (polímero e propeno não evaporados) pode ser conduzida para o sistema de desativação e secagem. A partir deste ponto, o polímero está pronto para ser armazenado ou extrudado para formar pellets (PETRY, 2011).

3.1.2 Estrutura e propriedades do polipropileno

A estrutura de cada polímero tem influência direta sobre a sua densidade e suas propriedades físicas e mecânicas. O polipropileno (PP) é um polímero de baixa densidade e semicristalino muito versátil (MANO,1999).

Em relação à taticidade, que representa a regularidade espacial dos grupos laterais na cadeia polimérica. O polipropileno pode ser classificado em: isotático, sindiotático e atático, como mostra a Figura 03. O PP isotático apresenta o grupo metil alinhado do mesmo lado da cadeia, o PP sindiotático o grupo metil está em alternância de posição e no PP atático o grupo metil está aleatoriamente posicionado (CANEVAROLO, 2006). O polipropileno convencional é isotático (iPP), obtendo essa configuração através de catalisadores Ziegler-Natta. O polipropileno isotático apresenta vantagens como fácil processamento e baixo custo de fabricação. No entanto, a baixa resistência mecânica do iPP limita suas aplicações, devido a este fato, com o objetivo de melhorar as propriedades desse material, pode ser empregada a incorporação de fibras (naturais, carbono, argilas, vidro, entre outras) como reforço na matriz iPP para produzir compósitos (ZHANG, 2016).

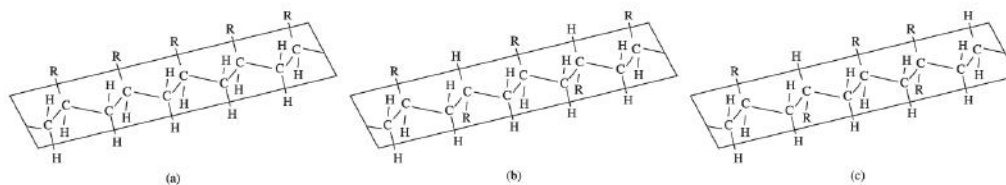


Figura 03 – Estereoisômeros de PP (a) isotático, (b) sindiotático e (c) atático

Fonte: Rosario et al, 2011

O PP isotático é o mais utilizado comercialmente por apresentar um equilíbrio entre custo reduzido, resistência à fadiga por flexão (ROSARIO et al, 2011)

Um resumo das propriedades do polipropileno é dado na listagem abaixo:

- Boa resistência química;
- Boa resistência ao impacto;
- Atóxico;
- Bom isolante térmico;
- Boa estabilidade térmica
- Baixa densidade;
- Bom isolante elétrico;
- Fácil moldagem, usinagem e soldagem;
- Fácil coloração;

3.1.3 Polipropileno e o meio ambiente

Com o crescente aumento populacional, e conseqüentemente, aumento da utilização de recursos do planeta, é coerente buscar o uso de fontes de matérias-primas renováveis e meios sustentáveis de produção para que com o tempo as fontes de matérias-primas fósseis possam ser utilizadas em menor quantidade, diminuindo, desta forma, o impacto na sociedade e no meio ambiente

Atualmente a produção de biopolímeros representa cerca de 1% dos 360 milhões de toneladas de plástico produzidos anualmente no mundo, mas esse ramo do mercado está em constante crescimento, devido ao aprimoramento das tecnologias e aos novos campos de interesse e aplicações (SIRACUSA & BLANCO, 2020)

Neste contexto, o PP pode ser obtido a partir de fontes renováveis como por exemplo o do etanol gerado por biomassa. A Braskem utiliza a cana-de-açúcar, que após ser colhida e moída, pode-se obter o melaço, um caldo com alto teor de

sacarose, que após fermentado produz o etanol. Com a desidratação do etanol gera-se o eteno. Com uma etapa de dimerização e outra de metátese, obtém-se o propileno é polimerizado para gerar o polipropileno verde. O processo de produção simplificado do polipropileno verde pode ser visualizado na Figura 04 (SILVA & NASCIMENTO et al, 2019).

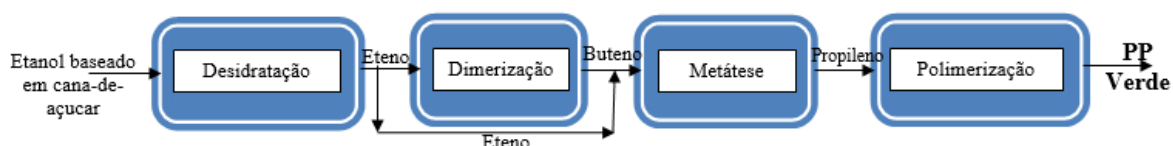


Figura 04 – Diagrama de blocos do processo Braskem de produção de polipropileno verde.
Fonte: Adaptado de BRASKEM, 2019.

3.1.4 Mercado do polipropileno

Segundo dados da ABIPLAST, em 2019 o polipropileno foi o polímero mais consumido no Brasil (21%), como mostra a Figura 05. A única produtora no país de polipropileno e polietileno é a Braskem, que atende diretamente mais de mil transformadores. Em 2020 a Braskem registrou lucro de R\$ 1,3 bilhão no primeiro trimestre, com um crescimento de 32% quando comparado ao mesmo período do ano anterior (Braskem, 2021).

Segundo dados da BBC News, 2020, o consumo de plásticos aumentou muito na pandemia do coronavírus, com maior volume de delivery de alimentos e do comércio eletrônico, além do maior uso de material hospitalar descartável como máscaras e luvas. Com isso houve também o aumento de lixo gerado, sendo o Brasil um país que recicla pouco desse material além de lançar toneladas de lixo no mar brasileiro anualmente, sendo uma ameaça para a fauna e flora marinha e para a saúde das pessoas. Torna-se cada vez mais necessário investir em reciclagem e outros destinos para o plástico rejeito.

Embora o consumo de plástico tenha aumentado, segundo dados da Abiplast (2020), a produção física da indústria geral sofreu um recuo de (-4.5%) em 2020 com relação a 2019. Houve um crescimento por oito meses consecutivos, porém o resultado 2020 fechou no negativo. No setor de transformados plásticos houve um crescimento de 2.4% em 2020(em relação a 2019) na produção física, sustentado pelo

segmento de embalagens e de tubos e acessórios para construção civil.

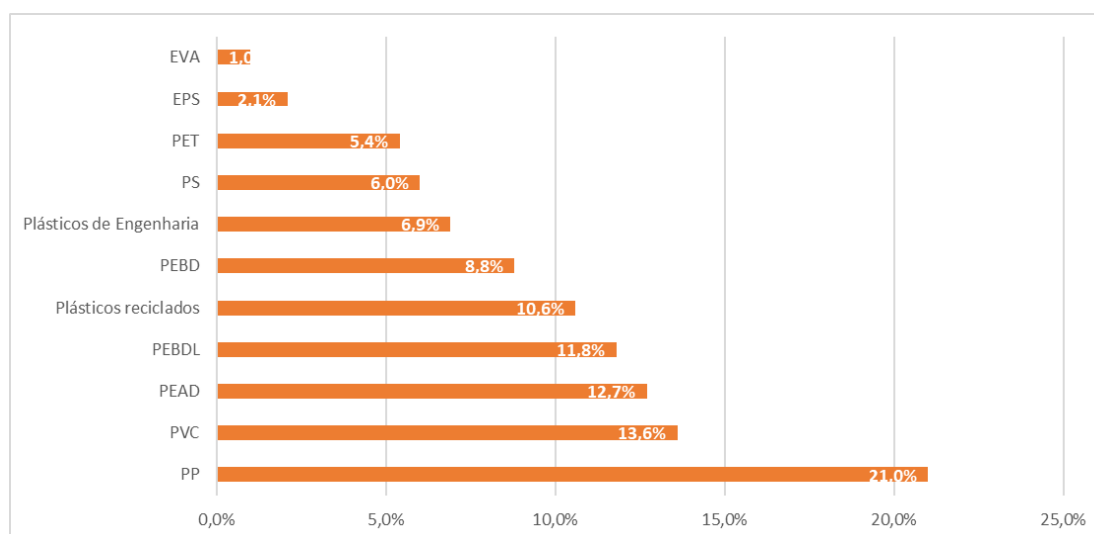


Figura 05 – Principais resinas plásticas consumidas no Brasil 2019
Fonte: Abiplast, 2019

3.2 Bagaço de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), originária do Sudeste asiático, é cultivada há séculos. Com o tempo, teve a sua cultura agrícola expandida ao redor do mundo, possuindo assim, papel importante em alguns períodos da história por provocar alterações econômicas e ecológicas (BATTISTELLE, 2008). A disseminação da cana-de-açúcar ao redor do mundo se deu em função do seu valor nutricional. No Brasil, esta planta foi introduzida pelos portugueses no século XVI. No início do século XX, o principal objetivo do cultivo da cana-de-açúcar era a produção de açúcar e etanol (MIRANDA et al, 2021).

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Dados de 2019, apontam uma produção de 753 milhões de toneladas de cana-de-açúcar para o Brasil. Além do Brasil destacam-se outros países como Índia (405 milhões de ton.), Tailândia (131 milhões de ton.), China (109 milhões de ton.), e Paquistão (67 milhões de ton.), conforme aponta a Figura 06 (MIRANDA et al, 2021).

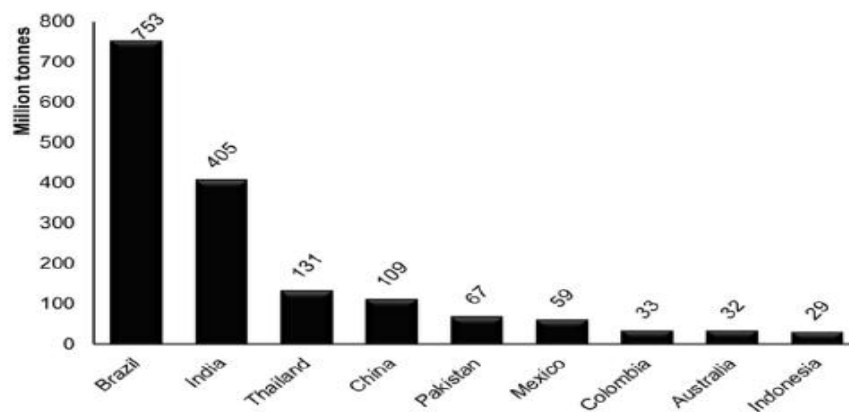


Figura 06 – Produção de cana-de-açúcar por países produtores em 2019
Fonte: MIRANDA et al, 2019

A legislação brasileira protege áreas de grande biodiversidade, como a região da Amazônia e o pantanal que são importantes biomas. De acordo com o Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar vigente desde 2009, novas áreas de plantio não têm licença para operar em regiões deste tipo. As grandes regiões produtoras de cana-de-açúcar no Brasil estão localizadas a mais de 2.500km de distância da Amazônia (IBGE, 2020).

A cana-de-açúcar (Figura 07) é a matéria-prima utilizada para obtenção de dois produtos essenciais para a economia mundial: o açúcar, componente importante da alimentação humana, e o álcool, que pode ser utilizado como combustível de automóveis. (BERNARDO et al, 2019). O bagaço (Figura 08) de cana-de-açúcar é um dos subprodutos da indústria sucroalcooleira, assim como a sacarose e a palha, e, portanto, necessita de tratamento e destinação final adequada a fim de não impactar o meio ambiente.



Figura 07 – Cana-de-açúcar
Fonte: CanalRural (<https://www.canalrural.com.br/>)



Figura 08 – Bagaço de cana-de-açúcar.
Fonte: Autoria própria

3.2.1 Composição do Bagaço de cana-de-açúcar

A planta da cana-de-açúcar pode ser dividida em três partes; raiz, caule e folhas, sendo o bagaço proveniente do caule. O bagaço é um subproduto fibroso que possui geralmente uma cor cinza-amarelada ou verde pálido e é volumoso. Este resíduo fibroso é proveniente do talo da planta após a moagem e extração do caldo, sendo basicamente constituído de fibras, água e pequenas porções de sólidos insolúveis (PAULA, 2011).

O bagaço de cana apresenta em sua composição química celulose, hemicelulose, lignina, e ainda açúcares residuais, pentoses, hexoses e outros produtos de baixo peso molecular. Apresenta estrutura cristalina e alto percentual de celulose, tornando-o extremamente resistente ao ataque químico. O tratamento térmico do bagaço de cana acima de 200 °C por um longo período pode ocasionar perda na estrutura da fibra (MOUBARIK, 2013).

Diversos fatores podem influenciar na composição química do bagaço de cana-de-açúcar como: condições climáticas, propriedades químicas, físicas e microbiológicas do solo, tipo de cultivo, variedade da cultura durante o desenvolvimento e maturação, além de outros fatores (OLIVEIRA, 2018).

O bagaço contém cerca de 54 - 86% de polissacarídeos, principalmente celulose (31 - 54%) e hemicelulose (13 - 39%). E possui lignina (11 - 27%). As cinzas (1 - 6%) e extrativos (2 - 25%) são os constituintes presentes em menor proporção. Devido a composição tão variável, é importante verificar os constituintes de cada

bagaço de cana, pois cada um deles terá um impacto diferente, dependendo da utilização desse resíduo (MIRANDA et al, 2021).

A celulose é o principal componente da parede celular das fibras naturais. É um polissacarídeo linear, constituído de anéis pirâmicos de glicose, com 90% de ligações β (1-4) glicosídicas entre monômeros. A hidrólise das moléculas de celulose tende a formar pontes de hidrogênio intramoleculares, responsáveis pela rigidez das cadeias unitárias e intermoleculares, relacionadas à formação da fibra vegetal. A hemicelulose compreende um grupo de polissacarídeos, excluindo pectinas, que ficam associadas à celulose após a remoção da lignina. Difere da celulose por apresentar diferentes unidades de açúcares. A lignina confere rigidez à parede celular, onde estão associadas com a hemicelulose, não apenas por interação física como também por ligações covalentes (ARAUJO, 2003).

3.2.2 Mercado de cana-de-açúcar

O maior produtor e exportador de cana-de-açúcar no mundo é o Brasil, que possui mais de 400 usinas em operação no país, com o emprego de novas tecnologias desde o plantio até a produção de açúcar, etanol e bioeletricidade.

De acordo com a CONAB (2021), o volume da produção de cana-de-açúcar no período de 2020/2021 totalizou 654,8 milhões de toneladas, 1,8% superior ao da safra 2019/20. Esse crescimento não acompanhou o aumento na área colhida devido às condições climáticas aversas em algumas regiões produtoras. A área colhida ficou em 8.62 milhões de hectares, com um aumento de 2,1% quando comparada com os dados de 2019/2020. Há produção nas cinco regiões do Brasil, como podemos ver na Figura 09. O Sudeste é a principal região produtora do país com 428,6 milhões de toneladas colhidas, indicando acréscimo de 3,3% em relação ao último ano, seguida pela região Centro-Oeste com 139.8 milhões, Nordeste com 48.4 milhões, Sul com 34.2 milhões e Norte com 3.36 milhões de toneladas de e cana-de-açúcar produzidas. As condições climáticas foram consideradas oscilantes durante o ciclo, mas de modo geral, estiveram favoráveis na maioria das regiões produtoras, especialmente no início do período de desenvolvimento, que apresentou bons índices de precipitação comparado aos últimos anos (CONAB, 2021).

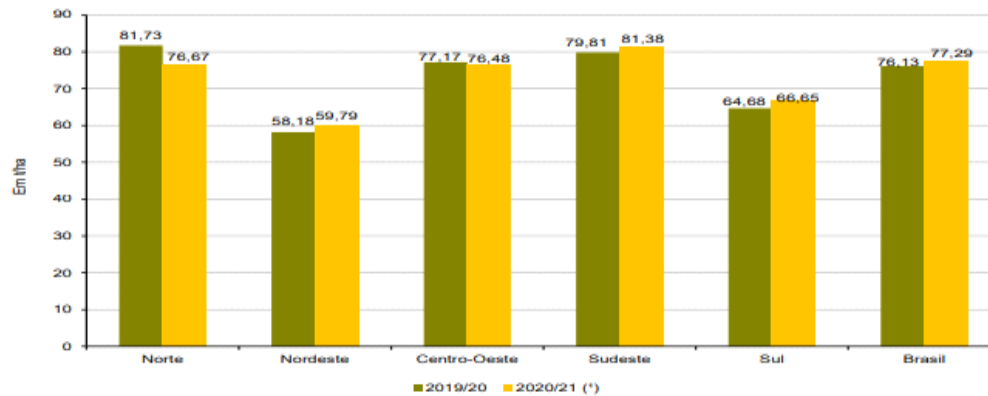


Figura 09 – Comparativo de produtividade de cana-de-açúcar por região. Fonte: CONAB, 2021.

A cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis, devido ao grande potencial na produção de etanol e seus respectivos subprodutos (CONAB, 2021).

3.2.3 Destino do bagaço de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar pode gerar alguns resíduos e subprodutos como o melaço (resultante da etapa de centrifugação, no processo de fabricação de açúcar), a levedura, a torta de filtro (proveniente da filtração do caldo extraído das moendas no filtro rotativo) e o bagaço, sendo este último um resíduo, que pode ser destinado à alimentação animal (MAPA, 2021). O bagaço é queimado em caldeiras para gerar vapor que acionam turbinas geradoras de energia. Esta energia abastece a própria usina e, quando excedente é comercializada para o abastecimento de cidades, porém esse resíduo ainda é subutilizado, devido a grande quantidade disponível (MIRANDA et al, 2021). Portanto, uma utilização para os resíduos da cana-de-açúcar é a geração de bioeletricidade a partir de biomassa. Porém, segundo levantamento da ÚNICA (2021) apenas 15% da energia gerada a partir dos resíduos da cana são aproveitados na rede nacional de energia, sendo um valor baixo, dado o seu potencial. Estima-se que a geração de bioeletricidade de cana em 2020 tenha evitado adicionalmente a emissão de 6.3 milhões de toneladas de CO₂, marca que somente seria atingida com o cultivo de 44 milhões de árvores nativas ao longo de 20 anos. A produção crescente de bioeletricidade proveniente do bagaço combinada com a ampla utilização de etanol faz da cana-de-açúcar a segunda maior fonte da matriz energética brasileira (UNICA, 2021).

Devido a subutilização do resíduo da cana-de-açúcar, há necessidade de tecnologias mais eficientes de processamento de bagaço para produção de energia e biocombustíveis e ainda demanda estudos de outras formas de utilização dessa matéria-prima que é um resíduo agrícola.

Na última década houve um aumento pelo interesse por fibras naturais e a sua utilização em compósitos poliméricos, uma vez que a poluição causada por resíduos de plástico é uma grande preocupação para o meio ambiente. Materiais que utilizam matéria prima de origem biológica e renovável, estão surgindo como alternativa aos materiais convencionais a base de petróleo. Nesse contexto, as fibras de plantas poderiam ser utilizadas como reforço em matriz polimérica, substituindo parte da matéria prima original de origem fóssil. Existem linhas de pesquisa que visam usar o bagaço de cana-de-açúcar como reforço em compósitos poliméricos, com objetivo de aproveitar as propriedades físicas desse rejeito abundante da produção de cana de açúcar. Com isso, é possível obter um novo material que contém menor quantidade de plástico, que se torna cada vez mais importante visto que a sociedade precisa caminhar para alternativas que utilizem menos desse material. Além de diminuir o ciclo de degradação natural do material, pois como em sua constituição existe parte orgânica, a degradação desse material é acelerada em comparação ao material formado inteiramente de plástico em sua composição (DAS; CHAUDHARY, 2021).

3.3 Materiais compósitos

Compósitos são materiais heterogêneos, multifásicos, separados por uma interface. As diferentes fases são combinadas a fim de produzir um compósito com propriedades estruturais ou funcionais melhores, quando comparadas com os componentes individuais. Materiais compósitos são comumente usados na fabricação de estruturas de aeronaves, dispositivos eletrônicos, embalagens, equipamentos médicos, veículos automotivos e espaciais, construção civil, entre outras aplicações (AISYAH *et al.*, 2021).

As fases dos compósitos são denominadas matriz e fase dispersa. A matriz geralmente é um material contínuo que envolve a fase dispersa (descontínua). Em relação a matriz, há três tipos de compósitos: compósitos de matriz cerâmica, compósitos de matriz polimérica, compósito de matriz metálica. A fase dispersa é geralmente denominada carga ou reforço. De acordo com o tipo de reforço, os

compósitos podem ser classificados como: particulados, fibrosos e laminados. Os compósitos particulados, são compostos de partículas como reforço, compósitos fibrosos são feitos com fibras e para compósitos laminados o reforço tem formato de lâminas (AISYAH *et al*, 2021).

Os compósitos fibrosos são feitos de fibras naturais ou fibras sintéticas (AISYAH *et al*, 2021). A matriz em um compósito reforçado com fibras desempenha o papel de transferir o esforço, enquanto as fibras fornecem a principal resistência ao esforço. Além disso, a matriz fornece uma barreira contra um ambiente externo e protege a superfície das fibras da abrasão mecânica (TAJ *et al.*, 2007).

A maioria dos compósitos fabricados comercialmente usam matrizes poliméricas, devido ao seu baixo custo e facilidade de processamento. Atualmente há um interesse crescente pelo uso de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais em diversas aplicações, devido à alta resistência das fibras naturais, por serem de fontes naturais, renováveis e biodegradáveis apresentam vantagem em relação as fibras sintéticas, devido aos atrativos ambientais e por apresentarem baixo custo (AISYAH *et al*, 2021). Outras características das fibras naturais que aumentam o interesse na sua utilização são; baixa densidade, dureza, boa resistividade térmica e mecânica. As principais desvantagens das fibras naturais são a sua natureza hidrofílica, a baixa permissividade a temperatura em processamento e tendência a formar aglomerados (MOUBARIK, 2013).

Os polímeros termoplásticos são flexíveis quando submetidos a calor e força, e podem ser moldados sob pressão e calor. Os termoplásticos mais utilizados na fabricação de compósitos poliméricos com fibras naturais são polietileno (PE), polipropileno (PP) e policloreto de vinila (PVC), pois esses polímeros são *commodities* e são largamente utilizados pela indústria, além de poderem ser processados a temperaturas abaixo de 200°C, evitando a degradação térmica das fibras naturais (AISYAH *et al*, 2021).

A incorporação de fibras naturais rígidas em matrizes poliméricas flexíveis proporciona a obtenção de um novo material que pode ter melhores propriedades quando comparado ao polímero puro. Esses compósitos podem ser caracterizados e avaliados por meio de várias técnicas específicas como; ensaio de tração, flexão, impacto, análise térmica, ressonância magnética nuclear (NMR), e espectroscopia na região do infravermelho (FTIR), microscopia eletrônica de varredura (SEM) (ARAUJO, 2003).

3.3.1 Interface entre a fibra e a matriz polimérica

A região de interação entre a matriz polimérica e a fibra natural nos compósitos é denominada de interface. A qualidade da interface fibra/matriz é de grande importância para a obtenção de compósitos com propriedades mecânicas esperadas (SHALWAN & YOUSIF, 2013). No entanto, a incompatibilidade entre as poliolefinas hidrofóbicas e a superfície hidrofílica das fibras de celulose acarretam uma série de problemas que afetam diretamente as propriedades dos compósitos. A umidade absorvida pelas fibras naturais prejudica a adesão na interface fibra / matriz, resultando em baixa eficiência de transferência de tensão, que pode resultar em propriedades mecânicas inferiores, quando comparadas ao PP. Para atenuar este comportamento, e melhorar a adesão entre os componentes do compósito é necessário aplicar métodos de modificação química na superfície da fibra, introduzindo grupos não polares ou eliminando grupos polares por interações físico-químicas. Além do tratamento da fibra, pode ser introduzido no sistema, um terceiro material com propriedades intermediárias entre fibra e matriz, como os chamados agentes de acoplamento ou compatibilizantes (ARAUJO *et al*, 2017).

Uma técnica de tratamento bastante difundida é a mercerização da fibra natural, que consiste em tratar a fibra com uma solução concentrada de hidróxido de sódio (NaOH) com objetivo de remover parcialmente os componentes solúveis em meio alcalino. Dessa forma, a superfície da fibra torna-se mais rugosa, diminuindo assim o grau de agregação. O tratamento com solução aquosa de NaOH pode reduzir o diâmetro da fibra e, assim, aumentar a relação entre comprimento e diâmetro favorecendo o aumento da área efetiva da superfície da fibra, melhorando a adesão com a matriz polimérica. No entanto, dependendo da concentração, pode ocorrer o excesso de deslignificação, o que resulta no enfraquecimento da fibra (BARTOS *et al*, 2020).

O agente compatibilizante ou agente de acoplamento é um material polimérico com grupos funcionais que são inseridos entre a superfície da matriz e da fibra. Esse material é capaz de interagir quimicamente tanto com a fibra natural, quanto com a matriz polimérica durante o processamento do compósito, promovendo uma adesão maior na interface dos componentes, melhorando assim as propriedades mecânicas dos compósitos obtidos. A intensidade da interação entre um agente de acoplamento

específico e as fibras, depende intrinsecamente das características da superfície da fibra à qual o agente de acoplamento é aderido. Os agentes compatibilizantes são normalmente compostos organometálicos tetrafuncionais, que são comumente conhecidos como agentes de acoplamento de silano, zirconato ou titanato (HO *et al.*, 2012). Um exemplo de agente compatibilizante é o Polybond® 3009, constituído de PEAD com anidrido maleico, que pode ser utilizado em compósitos de polietileno ou polipropileno reforçados com fibras naturais. Este agente de acoplamento fornece resistência à tração, flexão e impacto, além de promover menor absorção de água (ADDIVANT, 2019).

3.3.2 Propriedades dos compósitos

Muitas tecnologias modernas requerem uma combinação de propriedades que muitas vezes não são atendidas pelos materiais mais comuns, como ligas metálicas, materiais cerâmicos e materiais poliméricos. Dessa forma surge a necessidade de estudos para a obtenção de materiais com propriedades combinadas e superiores aos materiais convencionais isolados. O emprego de materiais compósitos pode melhorar as características mecânicas tais como: rigidez, tenacidade e resistência mecânica à temperatura ambiente e à alta temperatura (CALLISTER, 2019).

As propriedades físicas das fibras naturais, como resistência à tração, resistência ao impacto e módulo de elasticidade, variam consideravelmente, dependendo de sua composição química e estrutural e do tipo de fibra. Com relação às propriedades mecânicas, é desejável que as fibras apresentem boa resistência à tração, alta durabilidade, baixa densidade e boa aderência à matriz (KALIA *et al.*, 2011)

O desempenho dos compósitos está ligado as propriedades de seus materiais constituintes, da sua distribuição, da fração volumétrica de cada componente e da interação entre eles. A adesão entre a fibra natural e a matriz polimérica depende de diversos fatores como; o volume de fibra, a orientação da fibra e a matriz polimérica utilizada. As fibras celulósicas, em geral, tendem a agregar, o que dificulta uma distribuição uniforme pela matriz polimérica. (ARAÚJO, 2003).

O processo de obtenção de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais são fundamentais para a determinação das propriedades mecânicas do material obtido. Alguns métodos de processamento utilizados para a obtenção de compósitos poliméricos são a extrusão e moldagem por injeção. Temperatura,

pressão e tempo de processamento são fatores determinantes para obtenção de propriedades desejáveis. Se a temperatura utilizada for muito alta pode ocorrer a degradação da fibra, portanto os polímeros utilizados como matriz devem ter ponto de fusão inferiores a degradação da fibra. Na extrusão, o material termoplástico, é aquecido, amolecido e misturado com a fibra por meio de um único parafuso ou dois parafusos rotativos, comprimido e forçado a sair da câmara a uma taxa constante. A alta velocidade do parafuso pode resultar em um aumento de temperatura, ruptura das fibras. Velocidades baixas, no entanto, levam a misturas pouco homogêneas e adesão insuficiente das fibras à matriz (PICKERING *et al.*, 2016).

A aplicação tecnológica de um novo material depende de sua caracterização, que pode ser realizada através de suas propriedades térmicas e de um estudo prévio e detalhado de suas propriedades mecânicas, para que seja definido suas condições de utilização e desempenho (KABIR *et al.*, 2012). Segundo a literatura, as propriedades mecânicas dos compósitos são avaliadas em função do teor de fibras, tipo de tratamentos das fibras e a utilização ou não utilização de agentes compatibilizantes. As propriedades mecânicas são normalmente avaliadas por ensaios de tração, que fornecem parâmetros como o módulo de elasticidade ou módulo de Young, tensão máxima, tensão na ruptura, alongamento na ruptura, dentre outros (CAMPOS, 2016).

A capacidade de uma substância manter suas propriedades e características iniciais, durante um processamento térmico, como a extrusão, por exemplo, é denominada estabilidade térmica (MOTHÉ & AZEVEDO, 2002). A maioria das fibras naturais usadas como reforço em compósitos é termicamente instável acima de 200°C. Portanto, apenas polímeros com ponto de fusão abaixo de 200°C podem ser utilizados como matriz em compósitos com fibras naturais, por exemplo; PE, PP, PVC e PS (PICKERING *et al.*, 2016).

Para que propriedades mecânicas desejáveis sejam obtidas, as fibras usadas como reforço devem apresentar módulo de elasticidade e tensão de ruptura superior ao do polímero a reforçar, geometria adequada para garantir uma boa adesão à matriz e resistência à deterioração em contato com o polímero. A natureza filamentar das fibras impossibilita sua utilização direta em aplicações estruturais, portanto a matriz polimérica tem a função de dar forma estável ao compósito e garantir a transmissão dos esforços mecânicos às fibras (OLIVEIRA, 2018)

O comprimento da fibra e a sua distribuição na matriz são determinantes para

as propriedades dos compósitos e afetam diretamente a resistência desse material, pois a carga aplicada é transferida para as fibras através da interface fibra/matriz.

3.4 Análise Térmica

Análise Térmica é definida como um conjunto de técnicas que permitem medir as mudanças de uma propriedade física ou química de um material em função da temperatura ou do tempo, enquanto o material é submetido a uma programação controlada de variação de temperatura. Dentre as técnicas mais utilizadas para a caracterização de compósitos poliméricos com fibras naturais destacam-se a Termogravimetria (TG) e sua derivada, a Termogravimetria Derivada (DTG) e a Análise Térmica Diferencial (DTA). O desenvolvimento dessas técnicas, assim como suas aplicações, surgiu da necessidade de determinação da estabilidade térmica dos materiais, que só avançaram quando foram desenvolvidas formas acuradas de medir a temperatura dos materiais. O conhecimento dessas características é importante para o monitoramento das condições de processamento (PLANTE; FERNÁNDEZ; LEIFELD, 2009)

A análise térmica pode ser aplicada em diversas áreas de estudo, como; decomposição térmica; determinação de umidade, determinação de voláteis, determinação de resíduos e teor de cinzas; oxidação térmica; cinética de reação de cura e cristalização; diagrama de fases; determinação de calor específico; determinação de transição vítrea, de fusão, de tempo de armazenamento (shelf-life), dentre outros. Estas técnicas podem ser usadas em indústrias de diversas áreas como: indústria, petroquímica, farmacêutica, cerâmica, alimentícia, engenharia civil, dada a sua importância e relativa facilidade (MOTHÉ & AZEVEDO, 2002). Algumas vantagens atribuídas a essas técnicas são: a utilização de pequenas quantidades de amostra para a realização dos ensaios; variedade de resultados e informações em um único gráfico, além da amostra não necessitar de preparo prévio para ser analisada. Pode ser empregada também para obtenção de parâmetros cinéticos através de modelos matemáticos adequados ao tipo de estudo realizado (PLANTE; FERNÁNDEZ; LEIFELD, 2009).

3.4.1 Termogravimetria (TG)

A Termogravimetria (TG) é uma técnica de análise térmica em que a perda de massa da amostra é medida em função da temperatura ou do tempo. A amostra é colocada em uma balança de alta precisão dentro de um forno e pesada continuamente durante uma programação de aquecimento. A perda de massa associada a uma reação térmica é medida entre os pontos de inflexão da TG. Essa técnica pode ser usada para medir variações de massa (perda ou ganho) sofridas pela amostra, resultante de uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação) ou química (degradação, decomposição, oxidação), em função da temperatura ou tempo. (PLANTE; FERNÁNDEZ; LEIFELD, 2009)

3.4.2 Termogravimetria Derivada (DTG)

Para uma melhor avaliação e visualização das curvas TG, foram desenvolvidos instrumentos capazes de registrar automaticamente a derivada das curvas termogravimétricas, auxiliando a esclarecer cada etapa, uma vez que elas apresentam picos relacionados à cada variação de massa, permitindo uma melhor precisão no intervalo de temperatura. A Termogravimetria Derivada (DTG) é obtida através da derivada da Termogravimetria gráfico da TG, e fornece a primeira derivada da curva termogravimétrica em função do tempo ou da temperatura. Muitas vezes é mais simples interpretar e resolver eventos térmicos pela derivada da curva TG, que pode facilitar a definição da posição dos pontos de inflexão. Quando se verifica, a perda de massa em função do aumento da temperatura, através da TG, observa-se que para cada reação ao longo do aumento da temperatura existe um pico na derivada, indicando a perda de massa ocorrida. Os picos mostrados nas curvas DTG indicam a temperatura onde a velocidade de decomposição é máxima. (PLANTE; FERNÁNDEZ; LEIFELD, 2009)

3.4.3 Análise Térmica Diferencial (DTA)

A Análise Térmica Diferencial (DTA) é uma técnica que registra os efeitos térmicos das transformações, com ou sem variação de massa, pela diferença de temperatura entre a amostra que está sendo analisada e uma amostra de referência.

A amostra é colocada no equipamento e aquecida a uma razão de aquecimento uniforme. A temperatura da amostra é monitorada por meio de um termopar e comparada com a temperatura da referência inerte, a qual está submetida ao mesmo programa linear de aquecimento. À medida que ocorre o aquecimento a uma razão constante, a temperatura da amostra e da referência irão se manter iguais até que ocorra alguma alteração física ou química na amostra. Se a variação for exotérmica, a amostra irá liberar calor e a temperatura da amostra será maior que a temperatura da referência, por um curto período. No caso de variação endotérmica, a temperatura da amostra será temporariamente menor que a temperatura da referência. A diferença de temperatura é então plotada contra o tempo ou temperatura (PLANTE; FERNÁNDEZ; LEIFELD, 2009).

Uma curva típica de DTA apresenta diferentes dois tipos de picos: pico endotérmico (inferior a linha base), devido a fusão, transição da fusão ou às reações de decomposição e dissociação, e pico exotérmico (superior a linha base), devido a mudança de fase cristalina (MOTHÉ & AZEVEDO, 2002).

3.5 Ensaio Mecânico

Os ensaios mecânicos têm por objetivo caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais. Essas propriedades determinam a maior ou a menor capacidade que o material possui de transmitir ou resistir aos esforços que lhe são aplicados. Dentre as propriedades mecânicas, a mais relevante é a resistência mecânica, que permite que o material resista à ação de determinados esforços, como a tração e a compressão (CALLISTER, 2019).

O ensaio mecânico mais comum é realizado através do teste de tração, onde a amostra é submetida à tração e é deformada até a sua ruptura. A tração é aplicada de forma crescente na direção longitudinal do corpo de prova. O polipropileno, por exemplo, possui característica de deformação elástica inicial até o limite de escoamento, onde se atinge a tensão na força máxima e se forma um pequeno pescoço (neck), deformando o material plasticamente. Na fase elástica, uma vez retirada a carga aplicada, o material volta à sua forma original. Terminada a deformação elástica, tem início a deformação plástica, na qual ocorre uma deformação permanente no material, mesmo quando cessada a força de tração

(CALLISTER, 2019).

A resistência à tração é um parâmetro que representa a resistência à fratura de um material e sua capacidade de absorver energia ou força de impacto. É um dos principais indicadores de performance de materiais que é considerado ao selecionar plásticos com utilização estrutural. A maioria dos plásticos apresenta um tipo de fratura frágil com baixa resistência à fratura, o que pode limitar suas aplicações (SHIRVANIMOGHADDAM *et al*, 2021). O ensaio de tração é o ensaio de tensão-deformação mais utilizados. Fornecem uma série de parâmetros, como tensão máxima (Mpa); tensão na ruptura (Mpa); módulo de elasticidade ou módulo de Young (Mpa); deformação na ruptura (%) entre outros.

As propriedades mecânicas alcançadas pelos materiais compósitos reforçados com fibras naturais dependem das propriedades da matriz e das propriedades da fibra. A resistência à tração é mais sensível às propriedades da matriz, enquanto o módulo é dependente das propriedades das fibras. Em compósitos reforçados com fibras curtas, existe um comprimento crítico de fibra necessário para que ocorra uma condição de estresse máximo na matriz polimérica. Se o comprimento de fibra for menor do que o comprimento crítico, ocorrerá uma falha devido ao deslocamento da fibra na matriz polimérica (SHARMA *et al*, 2021).

3.5.1 Resistência a Tração

O ensaio de tração é realizado quando um corpo de prova é submetido a um esforço, por um equipamento denominado dinamômetro, que tende a alongá-lo até a ruptura, seguindo uma programação controlada. O corpo de prova deve possuir formas e dimensões padronizadas para que o experimento possa ser reproduzido e comparado. A carga sobre o corpo de prova aumenta numa velocidade razoavelmente lenta, de forma a obter satisfatoriamente a resistência do material (CALLISTER, 2019).

A resistência à tração é avaliada pela carga aplicada ao material por unidade de área, no momento da ruptura. A resistência à tração, ou tenacidade de um material, é indicada pelo ponto máximo de uma curva de tensão-deformação e, em geral, indica quando a tensão a qual o material estava submetido no momento da ruptura. Pode ocorrer que a tensão na ruptura não seja a tensão máxima, especialmente em compósitos poliméricos, pois esses materiais tendem a criação de um "pescoço"

(necking) a partir de determinada tensão, e então a tensão passa diminuir até o rompimento do material. Nesse caso, a máxima tensão que um material pode suportar ao ser esticado ou puxado antes de falhar, é denominada de Tensão na Força Máxima e a tensão no momento da falha do material é denominada de Tensão na Ruptura. É importante destacar que a tensão é definida, de modo geral, como a resistência interna de um corpo, quando há uma força externa atuando sobre ele, enquanto a deformação é definida como a variação qualquer desse corpo, por unidade da mesma dimensão, quando o corpo é submetido a um esforço qualquer (CALLISTER, 2019).

3.5.2 Módulo de Young

O módulo de Young, também conhecido como Módulo de elasticidade, é uma grandeza relacionada à elasticidade linear de um material e é definido pela razão entre a tensão aplicada e a deformação resultante, dentro do limite elástico, em que a deformação é totalmente reversível e proporcional à tensão. Nesta definição assume-se que o comprimento do corpo é muito maior que suas dimensões laterais. O Módulo de Young é um parâmetro mecânico que fornece a informação da rigidez do material sólido. Além disso, é uma propriedade intrínseca dos materiais, que depende da composição química, estrutura e defeitos, como poros e trincas (HESSEL et al, 2016)

3.5.3 Deformação na Ruptura

A deformação na ruptura é a razão entre o alongamento e o comprimento original da amostra. O alongamento na ruptura representa o aumento percentual do comprimento da peça sob tração até o momento da ruptura. Este alongamento para os plásticos pode variar de baixas porcentagens até mais de 100%. Com a adição de fibras, o alongamento até a fratura diminui. Neste caso, o processamento é impactado devido ao aumento da viscosidade e da abrasão nos equipamentos (OLIVEIRA, 2006).

4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados para produção e caracterização dos compósitos de polipropileno com fibras naturais de bagaço de cana-de-açúcar.

4.1 Materiais

4.1.1. Reagentes

- Polipropileno (PP) em forma de pellets (Figura 10);
- Bagaço de cana-de-açúcar, recolhido como resíduo no comércio do Rio de Janeiro;
- Agente compatibilizante Polybond® 3009, doado pela empresa Chemtura;
- Solução aquosa de hidróxido de sódio 5%(m/v), para tratamento das fibras



Figura 10- Polipropileno (PP) em forma de grânulos
Fonte: autoria própria

4.1.2. Equipamentos

- Analisador Termogravimétrico TA Instruments, modelo SDT Q600 ^a;
- Câmara de Mistura para Plastógrafo – Haake Instruments Inc. Modelo Rheomix600 ^b;
- Emic DL3000 Célula: Trd 25 Dinamômetro: Trd 15 ^b;
- Moinho de Facas – SEIBT – modelo MGHS 1.5 – 85 ^b;
- Peneiras MESH (Fundo, #35, #28, #20, #14, #08, #06) ^c;
- Prensa Hidráulica de Bancada – com aquecimento, Fred S. Carver Inc. modelo 2086 ^b;

a – Laboratório de análise térmica Ivo Giolito, DPO, EQ/UFRJ

b – Instituto de Macro Moléculas Eloisa Mano UFRJ

c – Laboratório de Processos Inorgânicos, DPI, EQ/UFRJ

4.2 Métodos

4.2.1 Preparo e tratamento do bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço de cana-de-açúcar foi obtido como resíduo pós uso e, portanto, apresentava relativa umidade. Para retirar a umidade presente no bagaço de cana-de-açúcar, ele foi exposto ao sol por uma semana. Em seguida, foi levado a estufa a 60°C por 2 horas. Após esse procedimento, o bagaço foi cortado em pequenos pedaços de cerca de 5 cm para facilitar a moagem. O bagaço foi moído em um moinho de facas SEIBT – modelo MGHS 1.5 – 85 e após a moagem, foi peneirado, por 10 minutos, utilizando jogo de peneiras mesh e peneirador. Foram utilizadas peneiras de 06, 08, 14, 20, 28, 35 MESH. O bagaço utilizado para a obtenção dos compósitos foi o que ficou retido nas peneiras de MESH 14 e MESH 20, e que correspondem à uma abertura de 1,41mm e 0,84 mm, respectivamente. O tratamento do bagaço de cana-de-açúcar foi realizado adicionando-se o mesmo a uma solução aquosa de NaOH 5% (m/v). O sistema foi submetido a agitação magnética por cerca de 2 horas. Após esse período, o bagaço foi lavado com água destilada e seco em estufa a 60°C por cerca de 1 hora (Figura 11).



Figura 11 – Bagaço de cana-de-açúcar moído, peneirado e tratado com solução aquosa de NaOH 5% (m/v). Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Obtenção dos compósitos

Os compósitos de polipropileno reforçados com bagaço de cana-de-açúcar foram obtidos pela técnica de mistura por fusão, utilizando-se um misturador Haake Instruments Inc. Modelo Rheomix600, com rotor do tipo Roller de dupla rosca (Figura 12). As misturas foram preparadas nas seguintes condições:

- Tempo de mistura: 7 minutos;
- Velocidade do rotor: 50 rpm;
- Temperatura da câmara de mistura: 180°C.

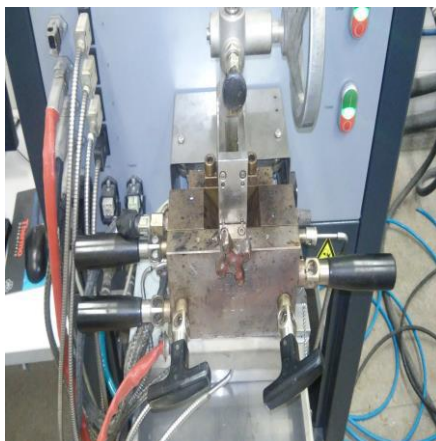


Figura 12 – Misturador Haake Fonte: Autoria própria.

Foram obtidas 12 misturas diferentes de compósitos, além do polímero puro sem adição de compatibilizante. Dessas misturas, 6 foram obtidas com bagaço retido na peneira de MESH 14 e 6 foram obtidas com bagaço retido na peneira de MESH 20.

Foi utilizada como matriz polimérica o polipropileno comercial e os compósitos foram preparados nas seguintes proporções de: 5%,10% e 20% de bagaço de cana-de-açúcar.

Foi empregado 1% de compatibilizante Polybond® 3009, em metade dos compósitos. Os compósitos obtidos foram:

PP + bagaço de cana-de-açúcar retido em peneira MESH 14 (abertura de 1,41mm):

- 5%,10% e 20% de bagaço de cana-de-açúcar, sem compatibilizante, totalizando 3 compósitos;
- 5%,10% e 20% de bagaço de cana-de-açúcar, com 1% de compatibilizante, para cada mistura, totalizando 3 compósitos

PP + bagaço de cana-de-açúcar retido em peneira MESH 20 (abertura de 0,84 mm):

- 5%,10% e 20% de bagaço de cana-de-açúcar, sem compatibilizante, totalizando 3 compósitos;
- 5%,10% e 20% de bagaço de cana-de-açúcar, com 1% de compatibilizante, para cada mistura, totalizando 3 compósitos

A proporção de polipropileno, bagaço de cana-de-açúcar e agente compatibilizante dos compósitos obtidos está resumida na Tabela 01.

Tabela 01 – Proporção de polipropileno, bagaço de cana-de-açúcar e agente compatibilizante dos compósitos obtidos

% de Bagaço de Cana-de-Açúcar	Fibras retidas no MESH	% de agente Compatibilizante	Compósitos Preparados
5%	14	-	PP95BG05#14
10%	14	-	PP90BG10#14
20%	14	-	PP80BG20#14
5%	14	1%	PP94BG05C1#14
10%	14	1%	PP89BG10C1#14
20%	14	1%	PP79BG20C1#14
5%	20	-	PP95BG05#20
10%	20	-	PP90BG10#20
20%	20	-	PP80BG20#20
5%	20	1%	PP94BG05C1#20
10%	20	1%	PP89BG10C1#20
20%	20	1%	PP79BG20C1#20
0%	-	-	PP100

4.2.3 Obtenção dos corpos de prova

Os compósitos foram prensados em prensa hidráulica de bancada com aquecimento (Figura 13), segundo a norma ASTM D638, com o objetivo de obter os corpos de prova (Figura 14) para realização do ensaio mecânico. As condições de prensagem para todos os compósitos e o polímero puro foram:

- Tempo de prensagem: 5 minutos;
- Pressão: 10.000 lbf/in²;
- Temperatura da prensa: 180°C.



Figura 13 – Prensa hidráulica de bancada (à esquerda) e Molde para corpos de prova ASTM D638 (à direita). Fonte: Autoria própria.



**Figura 14 – Corpos de prova obtidos para o Compósito 5%Fibra + 1%compatibilizante
Fonte: Autoria própria.**

4.2.4 Análise térmica

As técnicas TG/DTG e DTA foram utilizadas para avaliar a estabilidade e a decomposição térmica das amostras em função da perda de massa, quando submetidas a uma variação de temperatura.

As amostras analisadas foram o polímero puro, o bagaço puro e compósitos com 5%, 10% e 20% de fibra como reforço. As amostras de polímero puro e de compósito analisadas não utilizaram compatibilizante.

Foi utilizado um analisador termogravimétrico que realiza as análises de

TG/DTG e DTA simultaneamente, com as seguintes condições de análise:

- Razão de aquecimento: 10°C/min;
- Tipo de atmosfera: inerte (nitrogênio);
- Faixa de temperatura: 25 a 800°C;
- Massa das amostras: de 7 a 9 mg.

4.2.5 Ensaio mecânico

O ensaio de tração para os compósitos e o polímero puro foram realizados em dinamômetro EMIC (Figura 15), segundo a norma ASTM D638. Foi usada velocidade de separação de garras de 3mm/min e separação entre garras de 40mm, seguindo as especificações da norma para materiais compósitos poliméricos. Para cada amostra, foram utilizados 6 corpos de prova por teste.



Figura 15 – Dinamômetro EMIC
Fonte: Autoria própria.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados referentes às caracterizações térmica e mecânica dos compósitos de polipropileno reforçados com fibra de bagaço de cana-de-açúcar.

5.1 Caracterização térmica

As técnicas TG, DTG e DTA foram utilizadas para a caracterização térmica das amostras de fibras de bagaço de cana de açúcar, do polipropileno puro, e dos compósitos de PP com 5, 10 e 20% de fibras de bagaço de cana-de-açúcar retidas em peneira de MESH 20 e sem o uso de compatibilizante.

A Figura 16 apresenta as curvas TG/DTG e DTA para o bagaço de cana-de-açúcar. A curva da TG mostrou três estágios de decomposição. O primeiro estágio em aproximadamente 50°C, com perda mássica de 6%, atribuído à presença de água na fibra. O segundo estágio de decomposição ocorreu na faixa de 200 a 250°C, com 20% de perda mássica, atribuído aos extrativos orgânicos presentes no bagaço. O terceiro estágio foi observado na faixa de 250°C a 375°C, com 55% de perda de massa, referente à decomposição da lignina, celulose e hemicelulose. Foi verificado um resíduo de 16% na temperatura de 800°C. A curva DTG apresentou quatro estágios de decomposição. O primeiro ocorreu em torno de 50°C, associado à umidade presente na fibra. O segundo estágio por volta de 220°C, referente a extrativos orgânicos, proteína, amido, gomas, ceras e graxas. O terceiro ocorreu a 300°C, referente à decomposição da lignina. O quarto estágio de decomposição foi observado a 350°C, referente a celulose e hemicelulose. A curva DTA apresentou quatro eventos endotérmicos. Nas temperaturas de 50, 175, 220 e 360°C referentes respectivamente a evaporação da água, extrativos orgânicos, lignina e celulose e hemicelulose. Conforme a literatura, a degradação térmica das fibras naturais, em geral, é um processo de dois estágios, um na faixa de temperatura 220-280°C associado à degradação da hemicelulose, e outro na faixa de 280-300°C, devido à lignina. A degradação térmica das fibras também resulta na produção de voláteis nas temperaturas de processamento acima de 200°C, o que pode levar a produtos

poliméricos com densidades mais baixas e propriedades mecânicas inferiores (SAHEB & JOG, 1999).

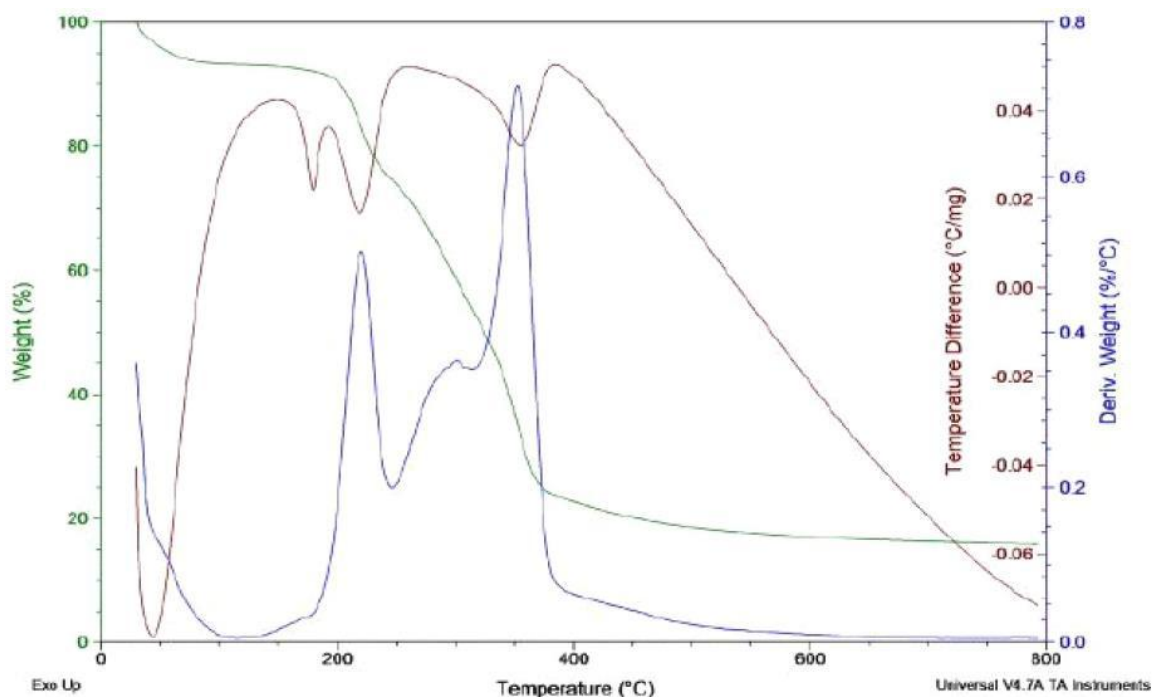


Figura 16 – Curvas TG (verde), DTG (azul) e DTA (vermelha) para o bagaço de cana-de-açúcar

Na Figura 17 pode-se observar as curvas TG/DTG e DTA para o polipropileno comercial. A curva TG apresenta um estágio de decomposição, com Tonset na temperatura de 420 °C, com perda mássica de 100%. A curva DTG apresentou um estágio de decomposição em 450 °C atribuído à decomposição do PP. A curva DTA mostrou dois eventos endotérmicos: o primeiro referente a T_m , em aproximadamente 160°C e o segundo por volta de 452 °C, referente à degradação principal.

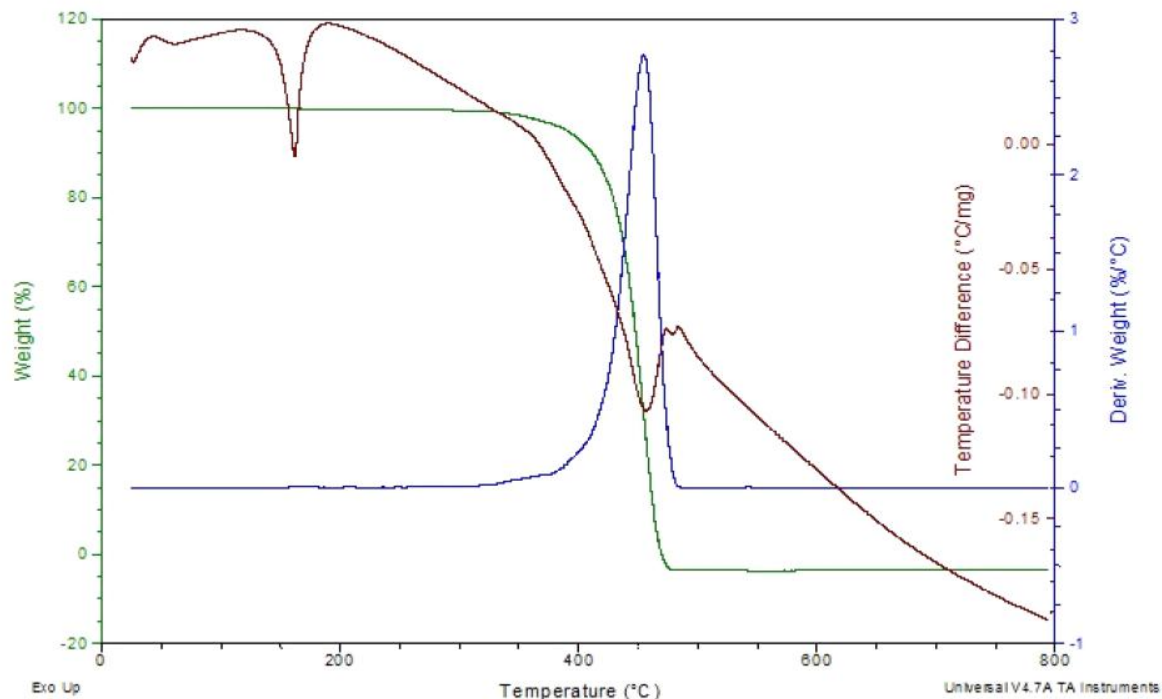


Figura 17 – Curvas TG (verde), DTG (azul) e DTA (vermelha) para o polipropileno puro

A Figura 18 mostra a estabilidade térmica do compósito de polipropileno com 5% de bagaço de cana-de-açúcar. A termogravimetria mostrou dois estágios de decomposição. O primeiro ocorreu em torno de 350°C, com 3% de perda de massa, atribuído à presença da fibra. O segundo estágio, com Tonset na temperatura de 415°C e com 95 % de perda de massa, refere-se à degradação do PP. Um resíduo de 2% foi encontrado a 800 °C, atribuído à presença de componentes inorgânicos na fibra. A DTG apresentou dois estágios de decomposição, em 350°C e 448 °C, corroborando com o observado na termogravimetria. A curva DTA mostrou três eventos endotérmicos. O primeiro referente a T_m , por volta de 160°C, o segundo, discreto, em 350 °C, referente à presença da fibra e o terceiro, em aproximadamente 450°C, referente à decomposição do PP.

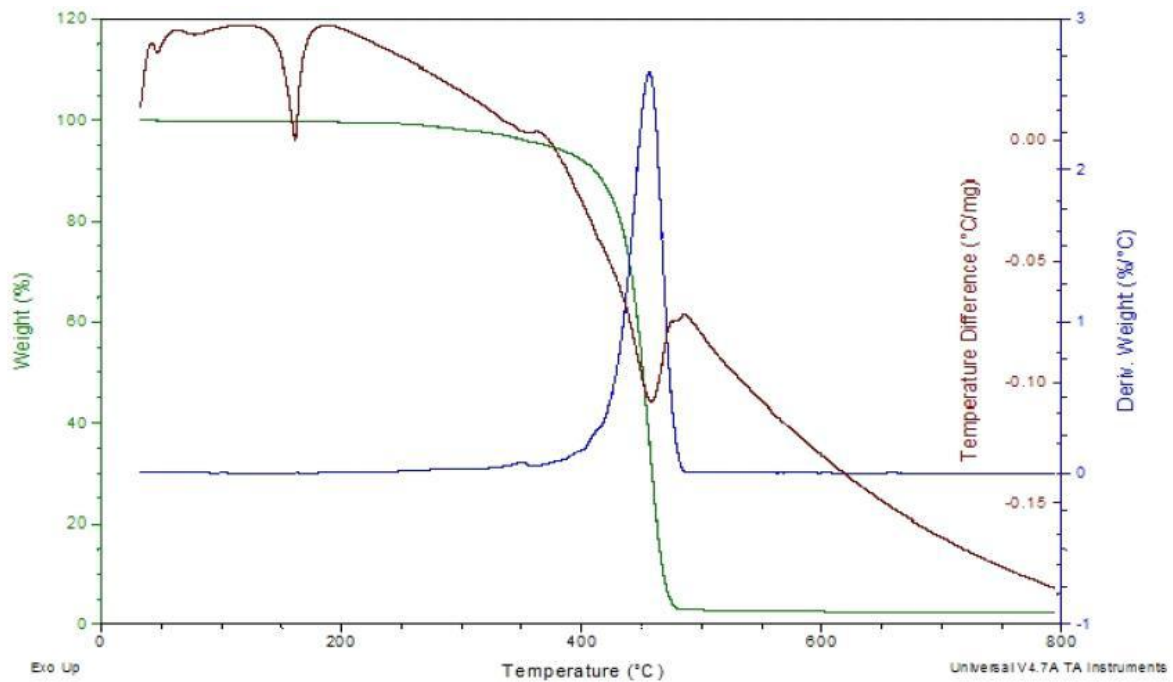


Figura 18 – Curvas TG (verde), DTG (azul) e DTA (vermelha) para o Compósito com 5% de bagaço de cana-de-açúcar.

As curvas TG/DTG e DTA para o compósito de polipropileno com 10% de bagaço de cana-de-açúcar podem ser observadas na Figura 19. A termogravimetria mostrou dois estágios de decomposição. O primeiro ocorreu em torno de 350 °C, com 6% de perda de massa, atribuído à presença da fibra. O segundo estágio, com Tonset na temperatura de 410 °C, apresentou 91 % de perda de massa, referente à degradação do PP. Um resíduo de 3 % foi encontrado na temperatura de 800 °C, atribuído à presença de componentes inorgânicos na fibra. A DTG apresentou dois estágios de decomposição, em 350 °C e 445 °C. A curva DTA mostrou três eventos endotérmicos. O primeiro referente à T_m do polímero, por volta de 160 °C, o segundo, discreto, em 348°C, referente à presença da fibra e o terceiro, em aproximadamente 450 °C, referente à decomposição do PP.

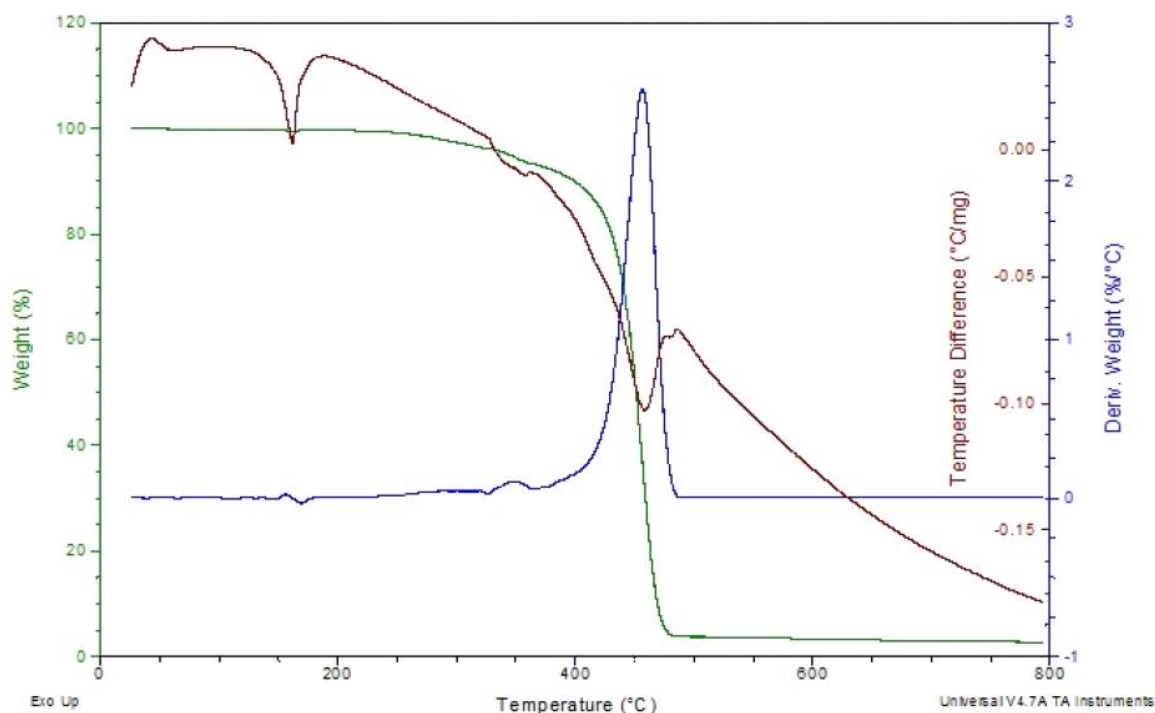


Figura 19 – Curvas TG (verde), DTG (azul) e DTA (vermelha) para o Compósito com 10% de bagaço de cana-de-açúcar

As curvas TG/DTG e DTA para o compósito de polipropileno com 20% de bagaço de cana-de-açúcar podem ser observadas na Figura 20. A termogravimetria mostrou dois estágios de decomposição. O primeiro ocorreu em torno de 350°C, com 10% de perda de massa, atribuído à presença da fibra. O segundo estágio, com Tonset na temperatura de 405°C e com 86 % de perda de massa, refere-se a degradação do PP. Um resíduo de 4 % foi encontrado na temperatura de 800 °C atribuído à presença de componentes inorgânicos na fibra. A DTG apresentou dois estágios de decomposição, em 350°C e 441°C. A curva DTA mostrou três eventos endotérmicos. O primeiro referente a T_m do PP, por volta de 160°C. O segundo ocorreu em 346°C, referente à presença da fibra. O terceiro, em aproximadamente 450°C, referente à decomposição do PP.

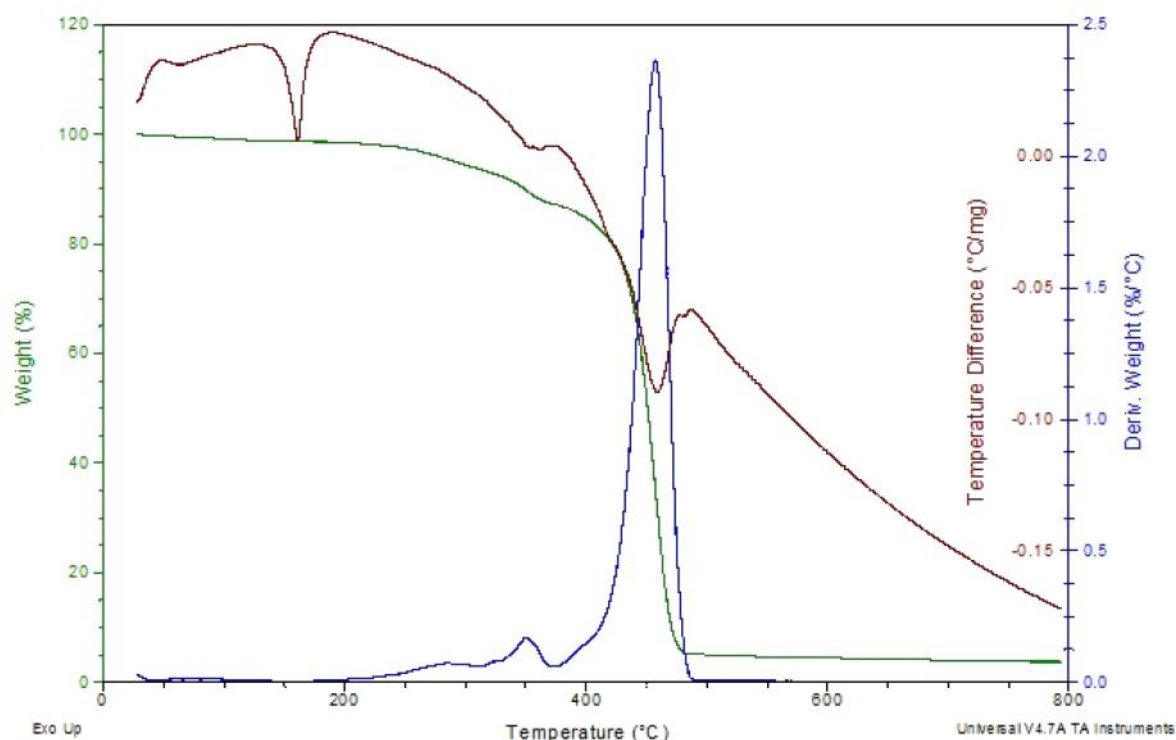


Figura 20 – Curvas TG (verde), DTG (azul) e DTA (vermelha) para o compósito com 20% de bagaço de cana-de-açúcar

Na Tabela 02 está representado os resultados de análise térmica do PP puro, do bagaço e dos compósitos.

Tabela 02 – Resultados das análises de TG, DTG e DTA para as amostras de PP puro, bagaço de cana-de-açúcar e de compósitos de PP com bagaço de cana-de-açúcar nas proporções de 5, 10 e 20% de fibra.

Amostra		TG			DTG		DTA	
Tipo de material	Quantidade de fibra (%)	Estágio de decomposição	Faixa de temperatura (°C)	Perda de massa (%)	Pico	Temperatura (°C)	Evento	Temperatura (°C)
PP	0	1	420	100	1	450	2	160 452
Bagaço de cana-de-açúcar	100	3	50 200-250 250-375	6 20 55	4	50 220 300 350	4	50 175 220 360
PP / Bagaço de cana-de-açúcar	5	2	350 415	3 95	2	350 448	3	160 350 450
	10	2	350 410	6 91	2	350 445	3	160 348 450
	20	2	350 405	6 91	2	350 441	3	160 346 450

5.2 Ensaio mecânico

A Figura 21 apresenta os resultados do ensaio mecânico de tensão na força máxima, tensão na ruptura e deformação na ruptura para o polipropileno puro e para os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço de cana-de-açúcar (retido na peneira de MESH 20) e sem agente compatibilizante. A Figura 22 mostra os compósitos com 5, 10 e 20% de fibra de bagaço de cana-de-açúcar retido em peneira de MESH 20 sem compatibilizante, após o rompimento no ensaio de Tração e a Figura 23 mostra o PP comercial puro após o ensaio de Tração.

O PP puro apresentou tensão na força máxima de 28,23 MPa e não apresentou ruptura nas condições de ensaio. Nos compósitos de PP com bagaço de cana-de-açúcar, a tensão na força máxima decresceu com a adição de fibra, apresentando valores de 23,31 MPa, 22,72 MPa e 20,77 MPa para os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço de cana-de-açúcar respectivamente. A tensão na ruptura decresceu com o aumento da adição de fibra e apresentou os valores de 15,59 MPa, 14,47 MPa e 13,34 MPa para os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço respectivamente. Os compósitos com 5% e 10% apresentaram valores de deformação na ruptura semelhantes: 6,55% e 6,29%. Foi observado um decréscimo na deformação na ruptura para o compósito com 20% de bagaço, sendo encontrado o valor de 4,48%.

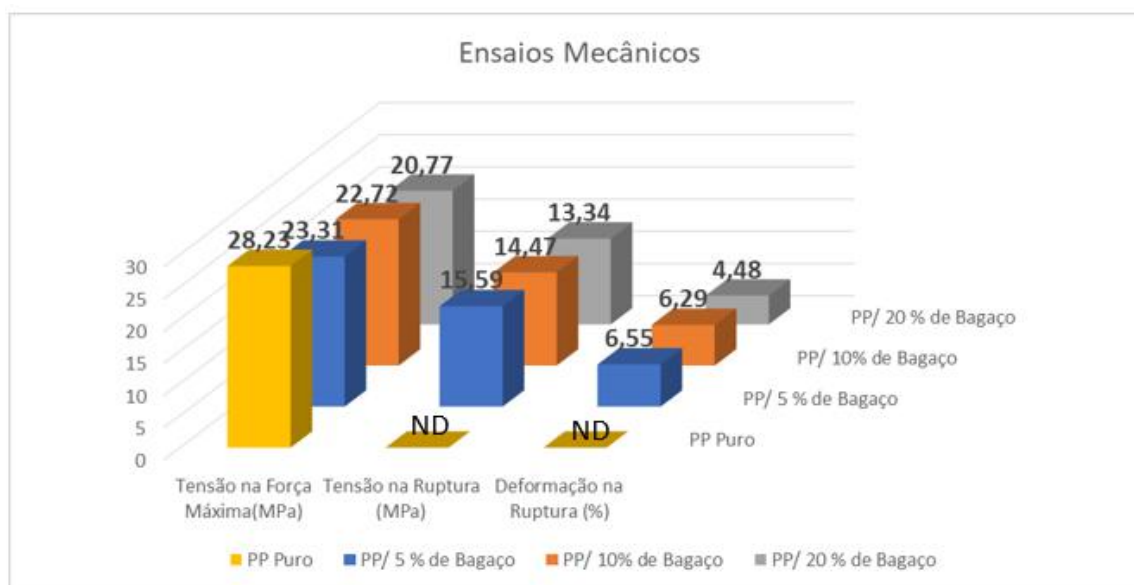
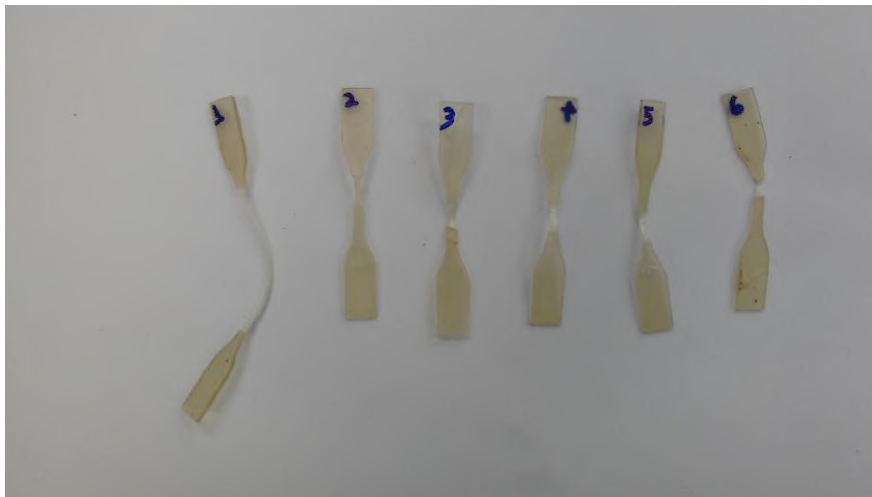


Figura 21 –Ensaio mecânico para o PP Puro e os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço de cana-de-açúcar retido em peneira de MESH 20 sem compatibilizante.



**Figura 22 – Compósitos com 5,10 e 20% de fibra de bagaço de cana-de-açúcar retido em peneira de MESH 20 sem compatibilizante, após o rompimento no ensaio de Tração.
Fonte: Aatoria própria.**



**Figura 23 – Polipropileno comercial puro após o ensaio de Tração
Fonte: Aatoria própria.**

A Figura 24 apresenta os resultados do ensaio mecânico de tensão na força máxima, tensão na ruptura e deformação na ruptura para o polipropileno puro e para os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço de cana-de-açúcar (retido na peneira de MESH 14) e sem agente compatibilizante. A tensão na força máxima decresceu com a adição de fibra, apresentando valores de 23,85 MPa, 21,86 MPa e 17,62 MPa para os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço respectivamente.

A tensão na ruptura também decresceu com a adição de fibra, com valores de 15,83 MPa, 13,9 MPa e 11,85 MPa para os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço respectivamente. Os compósitos com 5% e 10% apresentaram valores de deformação na ruptura semelhantes: 7,02% e 7,60%. Observou-se um decréscimo na deformação na ruptura para o compósito de PP com 20% de bagaço, sendo encontrado o valor de 5,07%.

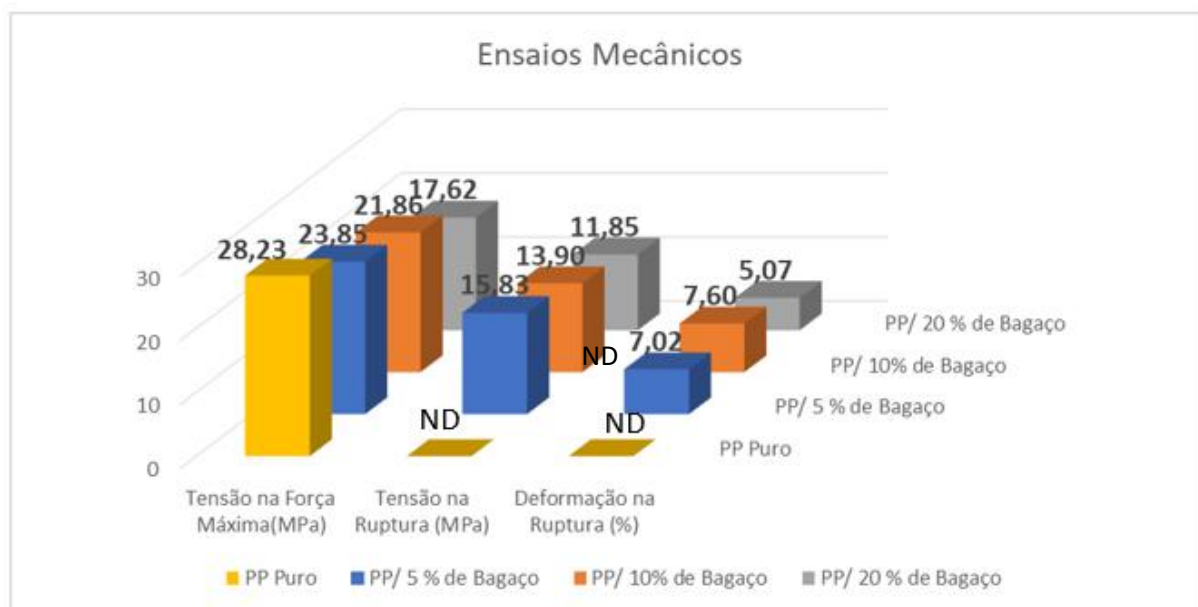


Figura 24 – Ensaio mecânicos para o PP Puro e os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço de cana-de-açúcar retido em peneira de MESH 14 sem compatibilizante.

A Figura 25 apresenta os resultados do ensaio mecânico de tensão na força máxima, tensão na ruptura e deformação na ruptura para o polipropileno puro e para os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço de cana-de-açúcar (retido na peneira de MESH 20) e com o uso de agente compatibilizante (1%). A tensão na força máxima decresceu com a adição de fibra, apresentando valores de 25,29 MPa, 22,22 MPa e 21,84 MPa para os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço respectivamente. A tensão na ruptura também decresceu com a adição de fibra, com valores de 17,44 MPa, 15,15 MPa e 13,49 MPa para os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço respectivamente. A deformação na ruptura apresentou um decréscimo com o aumento percentual da fibra incorporado a matriz polimérica, apresentando os valores de 5,08%, 4,78% e 3,92% para os compósitos de PP com 5%, 10%, 20% de bagaço.

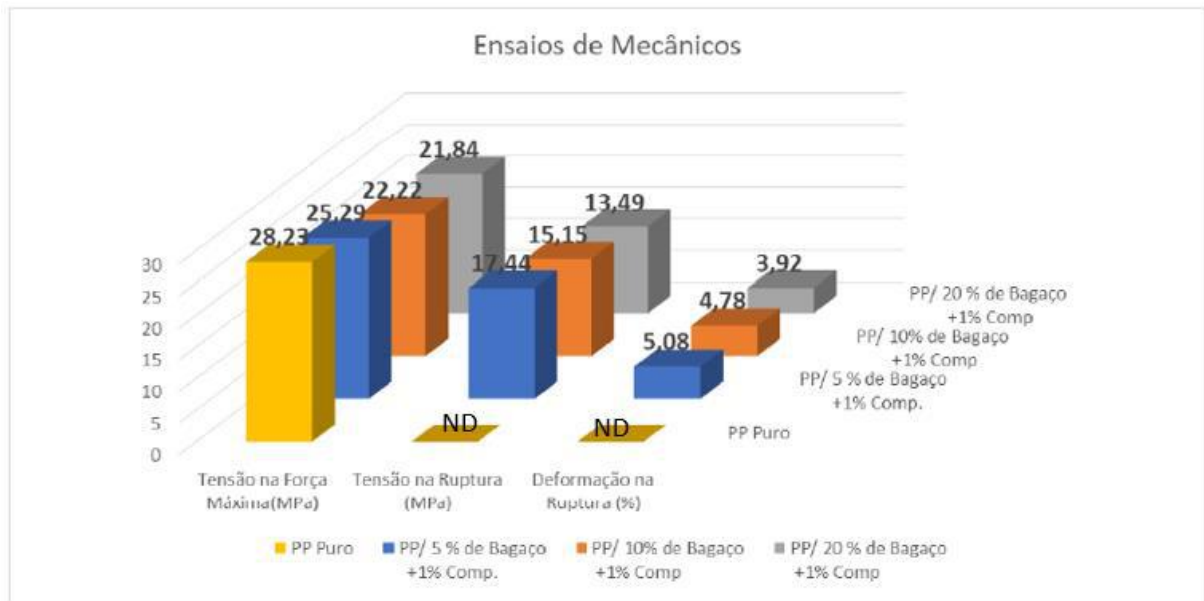


Figura 25 – Ensaio mecânicos para o PP Puro e os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço de cana-de-açúcar retido em peneira de MESH 20 com 1% de compatibilizante.

A Figura 26 apresenta os resultados do ensaio mecânico de tensão na força máxima, tensão na ruptura e deformação na ruptura para o polipropileno puro e para os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço de cana-de-açúcar (retido na peneira de MESH 14) e com o uso de agente compatibilizante (1%). A tensão na força máxima apresentou o valor de 20,9 MPa para os 3 compósitos obtidos. A tensão na ruptura decresceu com a adição de fibra, com valores de 14,03 MPa, 12,71 MPa e 11,19 MPa para os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço respectivamente. A deformação na ruptura também apresentou decréscimo para os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço, com valores de 5,38%, 4,95% e 4,38% respectivamente.

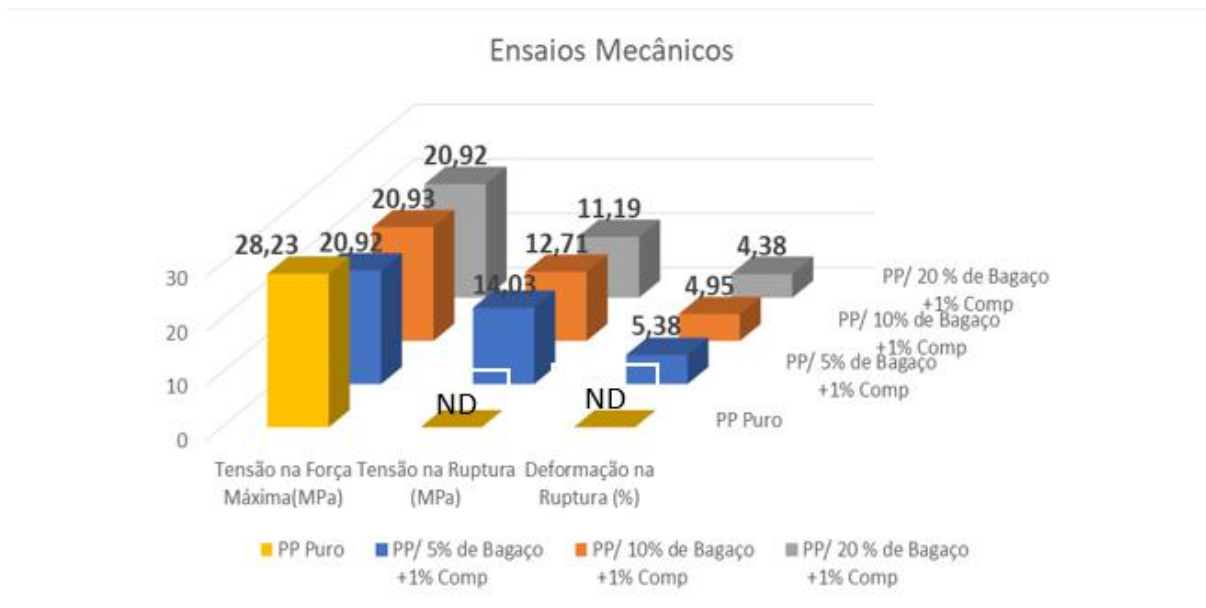


Figura 26 – Ensaio mecânico para o PP puro e os compósitos de PP com 5, 10 e 20% de bagaço de cana-de-açúcar retido em peneira de MESH 14 com 1% de compatibilizante

A Figura 27 apresenta os valores referentes ao Módulo de Young ou Módulo de Elasticidade, para o polipropileno puro (1273 MPa) e para os compósitos com 5%, 10% e 20% de bagaço de cana-de-açúcar, retidos em peneira de MESH14 e MESH20, com e sem o uso de compatibilizante.

Para os compósitos reforçados com bagaço retido em peneira de MESH 20 e sem o uso de compatibilizante, observou-se um aumento do módulo de elasticidade com a adição de bagaço à matriz do polímero, com valores de 1188 MPa, 1337 MPa e 1632 MPa, para os compósitos com 5%, 10% e 20% de fibra respectivamente. Com o uso de compatibilizante, foram encontrados valores de 1594 MPa, 1521 MPa e 1677 MPa (compósitos com 5%, 10% e 20% de bagaço). Observou-se que o uso de compatibilizante promoveu um aumento no módulo de elasticidade, principalmente para os compósitos com 5% e 10%.

Para os compósitos reforçados com bagaço retido em peneira de MESH 14 e sem o uso de compatibilizante, observou-se que os valores praticamente não sofreram alteração, sendo 1230 MPa (5% de bagaço), 1210 MPa (10% de bagaço) e 1202 MPa (20% de bagaço). O uso de compatibilizante provocou uma diminuição dos valores encontrados para o módulo de Young, quando comparados aos compósitos sem

compatibilizante sendo 1187MPa (5% de bagaço), 1135MPa (10% de bagaço), 1106 MPa (20% de bagaço).

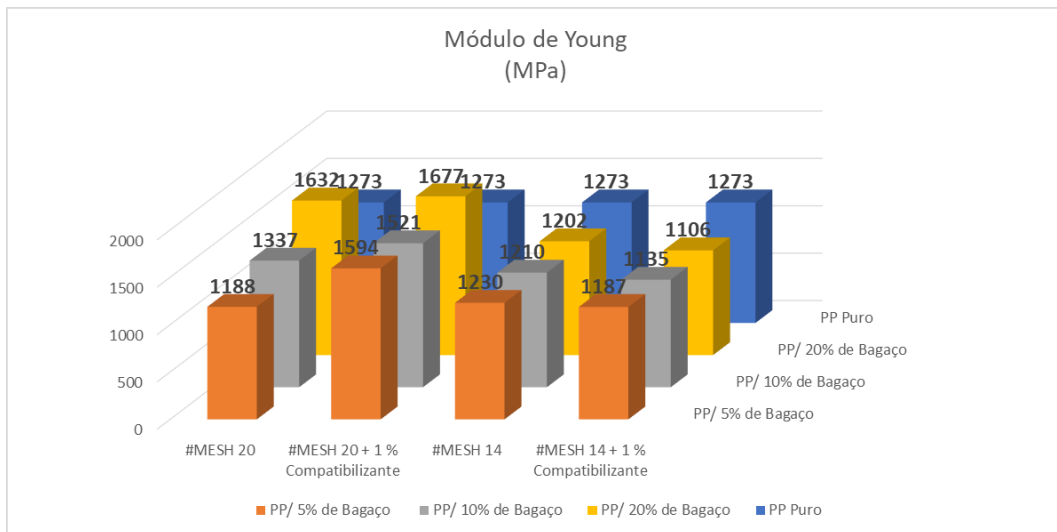


Figura 27 – Comparação entre os valores de Módulo de Young para os compósitos obtidos com fibra retida nas peneiras de MESH 20 e 14, sem agente compatibilizante e com 1% compatibilizante para as proporções de 5, 10 e 20% de fibras e o polipropileno puro.

A Tabela 03 apresenta os valores obtidos no ensaio mecânico para todos os compósitos preparados e para o polipropileno puro.

O compósito que apresentou maior valor de Tensão na Força Máxima, foi o **PP94BG05C1#20**, com 25,29 MPa. Este valor é inferior ao do polímero puro, que apresentou 28,23 MPa. O mesmo compósito apresentou maior Tensão na Ruptura, com 17,44 MPa. Este compósito utilizou 5% de fibra retida em peneira de MESH 20 e 1% de compatibilizante.

O valor de Tensão na Ruptura para todos os compósitos foi inferior a Tensão Máxima, pois antes de romper, o compósito apresenta deformação elástica, até o limite de escoamento, quando se inicia a formação do pescoço do corpo de prova e, nesse momento, a tensão cai até que o material sofra deformação plástica, tornando a elevar-se até o rompimento.

As fibras retidas na peneira de MESH 20 (abertura 0,84mm) são menores que as retidas na peneira de MESH 14 (abertura 1,14 mm). O compósito que resistiu a maior tensão tanto na ruptura, quanto na força máxima foi preparado com 5% de bagaço (retido na peneira de MESH20) e com 1% de compatibilizante. Portanto, quando uma quantidade menor de fibra é inserida na matriz polimérica e é utilizado

um agente compatibilizante, a adesão fibra/matriz ocorre de forma mais homogênea, conferindo a esse compósito uma melhor adesão e aumentando sua resistência à tração.

O compósito que apresentou menor Tensão na Força Máxima, com 17,62 MPa, foi o **PP80BG20#14**. Este compósito foi preparado com 20% de fibra retida em peneira de MESH 14 e sem o uso de compatibilizante. Com emprego de fibras de tamanhos maiores e sem o uso de agente compatibilizante, não ocorre uma boa interação carga/matriz. Este compósito resistiu a uma tensão menor também na ruptura (11,85 MPa).

No geral, os compósitos apresentaram decréscimo na tensão na força máxima e na tensão na ruptura, com o aumento da proporção das fibras, pois uma quantidade maior de fibra dificulta a adesão fibra / matriz. Vale ressaltar que os compósitos preparados sem o uso de compatibilizante, resistiram a valores de tensão mais baixos devido a pior adesão fibra/matriz, quando comparados com os compósitos que utilizaram 1 % de compatibilizante (BARTOS et al, 2021).

Os compósitos que apresentaram maior Deformação na Ruptura, ou seja, maior alongamento percentual, foram o **PP90BG10#14**, com deformação na ruptura de 7,60% e **PP95BG05#14**, com deformação na ruptura de 7,02%. Esses compósitos foram preparados com fibra retida em peneira de MESH 14, sem o uso de compatibilizante e nas proporções 10% e 5% de bagaço respectivamente. O compósito que apresentou menor deformação na ruptura (3,92%) foi o **PP79BG20C1#20**, que utilizou 20% de fibra retida em peneira de MESH 20 e 1% de compatibilizante.

Foi observado que os compósitos apresentaram decréscimo na deformação na ruptura com o aumento da proporção de fibra adicionada à matriz do polímero. Este resultado já era esperado, uma vez que a fibra é mais rígida do que a matriz polimérica e sua incorporação diminui a elasticidade do compósito obtido. Os compósitos com 1 % de compatibilizante apresentaram deformação menor do que os compósitos sem compatibilizante, quando comparados os mesmos tamanhos e proporções de fibra. O descolamento da fibra é mais suscetível na ausência de agente compatibilizante, devido a uma menor adesão fibra/matriz polimérica. Quando ocorre uma boa adesão fibra/matriz, observa-se a fratura da fibra. (BARTOS et al, 2021).

Tabela 03 – Ensaio Mecânico dos compósitos obtidos

Compósitos Preparados	Tensão na Força Máxima (Mpa)	Tensão na Ruptura (Mpa)	Deformação na Ruptura (%)	Módulo de Young (Mpa)
PP100	28,23	-	-	1273
PP95BG05#20	23,31	15,59	6,55%	1188
PP90BG10#20	22,72	14,47	6,29%	1337
PP80BG20#20	20,77	13,34	4,48%	1632
PP94BG05C1#20	25,29	17,44	5,08%	1594
PP89BG10C1#20	22,22	15,15	4,78%	1521
PP79BG20C1#20	21,84	13,49	3,92%	1677
PP95BG05#14	23,85	15,83	7,02%	1230
PP90BG10#14	21,86	13,90	7,60%	1210
PP80BG20#14	17,62	11,85	5,07%	1202
PP94BG05C1#14	20,92	14,03	5,38%	1187
PP89BG10C1#14	20,93	12,71	4,95%	1135
PP79BG20C1#14	20,92	11,19	4,38%	1106

6 CONCLUSÕES

- A obtenção dos compósitos foi realizada com êxito e foi possível a avaliação e comparação das propriedades térmicas e mecânicas dos compósitos de polipropileno reforçados com bagaço de cana-de-açúcar, com tamanhos diferentes de fibra, com e sem o uso de compatibilizante;
- O PP puro apresentou na curva TG, um único estágio de decomposição referente à sua degradação, o que foi comprovado através da curva DTG. A curva DTA apresentou dois eventos endotérmicos, o primeiro referente à T_m do polímero, aproximadamente a 160 °C, e o segundo à degradação do PP, por volta de 452 °C;
- O bagaço de cana-de-açúcar apresentou, na curva TG, três estágios de decomposição. A DTG apresentou quatro estágios de decomposição. O primeiro, referente à umidade presente na fibra, o segundo, referente a extrativos orgânicos, proteína, amido, gomas, ceras e graxas, o terceiro, referente à decomposição da lignina e o quarto estágio de decomposição, referente a celulose e hemicelulose. A curva DTA apresentou quatro eventos endotérmicos.
- A degradação das fibras ocorre acima de 200°C e o polímero se degrada por volta dos 450°C. Como a temperatura de fusão (T_m) do polímero ocorre a 160°C, recomenda-se o processamento do compósito por volta de 170°C, garantindo que o polímero irá se fundir e se misturar às fibras sem degradá-las.
- Os compósitos de PP com bagaço de cana-de-açúcar apresentaram na curva TG dois estágios de decomposição, corroborados pelos picos da curva DTG, sendo o primeiro referente à degradação da fibra e o segundo referente à degradação do polímero. A curva DTA apresentou três eventos endotérmicos, sendo o primeiro a 160°C, referente à T_m do polímero; o segundo, discreto aproximadamente a 350°C, atribuído à degradação de aditivos presentes no polímero e a degradação da fibra; e o terceiro a 450°C, resultante da decomposição do PP;
- Os resultados do ensaio mecânico mostraram a diminuição da tensão na força máxima, da tensão na ruptura e da deformação na ruptura com a adição de fibra, bem como o aumento do módulo de elasticidade com o aumento do percentual de fibra no compósito. O valor de Tensão na Ruptura para todos os compósitos foi inferior aos valores de Tensão Máxima.

- O resultado do ensaio mecânicos mostraram maior tensão na força máxima, na tensão na ruptura e na deformação na ruptura e maior módulo de elasticidade, para os compósitos com fibras menores, ou seja, retidas na peneira de MESH 20, quando comparadas com as fibras retidas na peneira de MESH 14;
- Os compósitos obtidos sem o uso de compatibilizante, resistiram a valores de tensão mais baixos devido a pior adesão fibra/matriz, quando comparados com os compósitos que utilizaram 1 % de compatibilizante;
- A diminuição dos valores na tensão na força máxima, em relação ao valor encontrado para o polímero puro, comprovou que a adesão entre a fibra e a matriz não ocorreu de forma satisfatória, mesmo com o uso de 1% compatibilizante;
- A diminuição dos valores encontrados para a deformação na ruptura já era esperada, uma vez que a fibra é mais rígida que o polímero. Portanto, a elasticidade do compósito diminui com a adição de fibra e, por consequência, o seu módulo de elasticidade aumenta, ou seja, o material se torna mais rígido. Estas grandezas são inversamente proporcionais, pois quanto mais elástico o material, menor é seu módulo de elasticidade;
- O compósito que apresentou maior valor de tensão na força máxima (25,29 MPa) e maior tensão na ruptura (17,44 MPa) foi o **PP94BG05C1#20**. O compósito que apresentou menor tensão na força máxima, com 17,62 MPa, foi o **PP80BG20#14**. Os compósitos que apresentaram maiores valores para deformação na ruptura, ou seja, maior alongamento percentual, foram o **PP90BG10#14**, com deformação na ruptura de 7,60% e **PP95BG05#14**, com deformação na ruptura de 7,02%

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Uso de maior percentual de agente compatibilizante avaliar a adesão do reforço à matriz e diminuição da tensão interfacial.
- Emprego de técnicas de análise para melhor determinação e avaliação das propriedades, tais como a calorimetria exploratória diferencial, análise mecânico-dinâmica, ensaios de flexão, espectrometria de fluorescência de raios x e na região do infravermelho, microscopia ótica, entre outras.
- Obter compósitos de Polipropileno reciclado, nas mesmas condições do compósito obtido com polipropileno puro, para poder comparar os compósitos obtidos com PP virgem e PP reciclado, a fim de possibilitar o emprego do PP reciclado, visto a abundância do consumo desse plástico e também a facilidade de seu processamento.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico. Perfil 2020.

Disponível em:

http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2021/08/Perfil2020_abiplast.pdf

Acessado em 12/09/2021.

ADDIVANT – Solutions to breakthrough™

Disponível em https://www.brenntag.com/media/documents/bsi/product_data_sheets/material_science/addivant/polybond_3009_pds.pdf

Acessado em 08/08/2021

ANGGONO, Juliana; FARKAS, Ágnes Elvira; BARTOS, András; MÓCZÓ, János; ANTONI; PURWANINGSIH, Hariyati; PUKÁNSZKY, Béla. Deformation and failure of sugarcane bagasse reinforced PP. **European Polymer Journal**, [S.L.], v. 112, n. 1, p. 153-160, Elsevier BV. 2019.

AISYAH, H. A.; PARIDAH, M. T.; SAPUAN, S. M.; ILYAS, R. A.; KHALINA, A.; NURAZZI, N. M.; LEE, S. H.; LEE, C. H. A Comprehensive Review on Advanced Sustainable Woven Natural Fibre Polymer Composites. **Polymers**, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 471, 2 fev. 2021. MDPI AG

ALMEIDA, D.F.R. Desenvolvimento de compósito a partir do polietileno de alta densidade reciclado (PEADr) reforçado com o endocarpo do coco (EDC). Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia, 2015.

ARAÚJO, C.R. Cinética de decomposição térmica de compósitos poliméricos com fibras de curauá. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

ARAÚJO, Rafael S.; REZENDE, Claudinei C.; MARQUES, Maria F. V; FERREIRA,

Leonardo C.; RUSSO, Pietro; ERRICO, Maria Emanuela; AVOLIO, Roberto; AVELLA, Maurizio; GENTILE, Gennaro. Polypropylene-based composites reinforced with textile wastes. **Journal of Applied Polymer Science**, [S.L.], v. 134, n. 28, p. 45060, 2017

ASTM D638-03. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. USA. 2003

BARTOS, András; UTOMO, Benny Putra; KANYAR, Barnabás; ANGGONO, Juliana; SOETAREDJO, Felycia Edi; MÓCZÓ, János; PUKÁNSZKY, Béla. Reinforcement of polypropylene with alkali-treated sugarcane bagasse fibers: mechanism and consequences. **Composites Science And Technology**, [S.L.], v. 200, p. 108428, nov. 2020. Elsevier BV.

BARTOS, András; KÓCS, Judit; ANGGONO, Juliana; MÓCZÓ, János; PUKÁNSZKY, Béla. Effect of fiber attrition, particle characteristics and interfacial adhesion on the properties of PP/sugarcane bagasse fiber composites. **Polymer Testing**, [S.L.], v. 98, n. 1, p. 107189-7, jun. 2021

BARBOSA, L.A.; DREGER, A.A.; SCHNEIDER, E.L.; MORISSO, F.D.P.; SANTANA, R.M.C. Polietileno de baixa densidade - PEBD: mercado, produção, principais propriedades e aplicações. **Revista Espacios**, 38, 10-23, 2017.

BATTISTELLE, Rosane A.G. et al. Emprego do bagaço da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e das folhas caulinares do bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* na produção de cargas de partículas. *Revista Minerva – Pesquisa & Tecnologia*, São Paulo, v. 5, n 3, p.297 – 305. Set.2008.

BERNARDO, Roberto; LOURENZANI, Wagner Luiz; SATOLO, Eduardo Guilherme; CALDAS, Marcellus Marques. Analysis of the agricultural productivity of the sugarcane crop in regions of new agricultural expansions of sugarcane. **Gestão & Produção**, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 1-3, 12 ago. 2019. FapUNIFESP (SciELO).

BRASKEM – Mercado do de resinas plásticas.

Disponível em <https://www.braskem.com.br/detalhe-noticia/braskem-registra-ebitda-de-r-13-bilhao-no-primeiro-trimestre-e-receita-liquida-de-vendas-de-r-126-bilhoes>

Acessado em 27/07/2021

CALLISTER, W. D. Jr. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais – uma abordagem integrada. LTC – Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., 5ª edição, Rio de Janeiro, 2019.

CANEVAROLO JR. Sebastião V; Ciência dos polímeros, Artiliber Editora, p. 17-33, 2006

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR | v. 7 - Safra 2020/21, n.4 - Quarto levantamento. ISSN: 2318-7921, 2021.

BBC

Disponível em <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-55131470>

Acessado em 27/07/2021

DAS, Partha Pratim; CHAUDHARY, Vijay. Moving towards the era of bio fibre-based polymer composites. Cleaner Engineering and Technology, [S.L.], v. 4, n. 100182, p. 1-3, Elsevier BV. out. 2021.

FORLIN, F.J.; FARIA, J.A.F. Considerações Sobre a Reciclagem de Embalagens Plásticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 12, 1-10, 2002.

GOOCH, J. W; Encyclopedic Dictionary of Polimers, Springer Publisher, p-763-766, 2007

GOSCH, Anja; ARBEITER, Florian J.; BERER, Michael; PINTER, Gerald. Comparison of J-integral methods for the characterization of tough polypropylene grades close to the glass transition temperature. **Engineering Fracture Mechanics**, [S.L.], v. 203, p. 2-17, nov. 2018. Elsevier BV

HESSEL, Roberto; FRESCHI, Agnaldo A.; ROSADO, Everton C.; BARREIRO, Luiz A. Determinação do módulo de Young em sólidos a partir da medida da velocidade do som pelo método do tempo de voo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, FapUNIFESP (SciELO) [S.L.], v. 38, n. 2, p. 1-10, 2016.

HO, M.; WANG, H.; LEE, J.H.; HO, C.K.; LAU, K.T.; LENG, J.; HUI, D. Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. **Composites: Part B**, 43, 3549–3562, 2012.

KABIR, M.M.; WANG, H.; LAU, K.T.; CARDONA, F. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. **Composites: Part B** 43, pp. 2883–2892, 2012

KALIA, S.; KAITH, B.S.; KAURS, I. Livro: Cellulose Fibers: Bio and NanoPolymer Composites. New York: Springer. 2011

KARIMAH, Azizatul; RIDHO, Muhammad Rasyidur; MUNAWAR, Sasa Sofyan; ADI, Danang Sudarwoko; ISMADI; DAMAYANTI, Ratih; SUBIYANTO, Bambang; FATRIASARI, Widya; FUDHOLI, Ahmad. A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 13, p. 2442-2458, jul. 2021. Elsevier BV

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Disponível em <https://www.gov.br/pt-br/orgaos/ministerio-da-agricultura-pecuaria-e-abastecimento>

Acessado em 01/08/2021

MANO, E.B.; MENDES, L. C. Introdução a polímeros. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Editora Edgard Blücher, 2ª edição, 1999.

MIRANDA, Nahieh Toscano; MOTTA, Ingrid Lopes; MACIEL FILHO, Rubens; MACIEL, Maria Regina Wolf. Sugarcane bagasse pyrolysis: a review of operating conditions and products properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 149, p. 111394-111414, out. 2021. Elsevier BV

MOTHÉ, C.G.; AZEVEDO, A.D. Análise térmica de materiais. I-editora, São Paulo, 2002.

OLIVEIRA, O. C. Avaliação de Fibras de Bagaço de Cana-de-açúcar In-natura e

modificada para aplicação em Compósitos Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2018.

PETRY, A. Mercado brasileiro de polipropileno com ênfase no setor automobilístico. Projeto de final de graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

PICKERING, K.L.; ARUAN EFENDY, M.G.; LE, T.M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composites: Part A**, 83, 98–112, 2016.

PLANTE, Alain F.; FERNÁNDEZ, José M.; LEIFELD, J.. Application of thermal analysis techniques in soil science. **Geoderma**, [S.L.], v. 153, n. 1-2, p. 1-10, out. 2009. Elsevier

PORRI, Lido. Os anos 1954-1953 no Politécnico de Milão. *Polímero: Ciência e Tecnologia*, v. 19, nº 3, 2009. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/po/a/f5gW65fzyfhK4n65jrMNx3f/?lang=pt>>. Acesso em: 18 de Maio de 2021

ROSÁRIO, Francisco; PACHEKOSKI, Wagner M.; SILVEIRA, Ana P. J.; SANTOS, Sérgio F. dos; S. JÚNIOR, Holmer; CASARIN, Suzan Aline. Resíduos de sisal como reforço em compósitos de polipropileno virgem e reciclado. **Polímeros**, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 90-97, 29 abr. 2011.

SHALWAN, A.& YOUSIF, B.F. In State of Art: Mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres. *Materials and Design* 48, 14–24, 2013.

SHARMA, Manoj; SHARMA, Rajeev; SHARMA, Shashi Chandra. A review on fibres and fillers on improving the mechanical behaviour of fibre reinforced polymer composites. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 46, n. -, p. 6482-6489, 2021

SHIRVANIMOGHADDAM, Kamyar; BALAJI, K.V.; YADAV, Ram; ZABIHI, Omid;

AHMADI, Mojtaba; ADETUNJI, Philip; NAEBE, Minoo. Balancing the toughness and strength in polypropylene composites. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 223, n. 1, p. 109-121, 2021

SILVA, Felipe Pereira da; NASCIMENTO, Bruna Cristina Martins do; SILVA, Diogo Pimentel de Sá da; DIONÍZIO, Thaís Petizero. POLIPROPILENO VERDE A PARTIR DO GLICEROL: estudo de mercado e instalação de uma planta no Brasil. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia - Issn: 1984-5693**, [S.L.], v. 11, p. 95-106, 19 dez. 2019. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro

SIRACUSA, Valentina; BLANCO, Ignazio. Bio-Polyethylene (Bio-PE), Bio-Polypropylene (Bio-PP) and Bio-Poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): recent developments in bio-based polymers analogous to petroleum-derived ones for packaging and engineering applications. **Polymers**, [S.L.], v. 12, n. 8, p. 1641, 23 jul. 2020.

TAJ, S.; MUNAWAR, M.A.; KHAN, S. Natural fiber-reinforced polymer composites. **Proc. Pakistan Acad. Sci.**, 44(2), 129-144, 2007.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar.

Disponível em <https://unica.com.br/noticias/bioeletricidade-pode-ajudar-a-salvar-o-brasil-da-falta-de-energia/>

Acessado em 01/08/2021

ZHANG, Liying; QIN, Yijing; ZHENG, Guoqiang; DAI, Kun; LIU, Chuntai; YAN, Xingru; GUO, Jiang; SHEN, Changyu; GUO, Zhanhu. Interfacial crystallization and mechanical property of isotactic polypropylene based single-polymer composites. **Polymer**, [S.L.], v. 90, n. , p. 18-25, Elsevier BV. 2016