

Universidade Estadual de Maringá



**CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

MATHEUS LIMA CAMAROTTO

**Desenvolvimento de processo de reciclagem de resíduo autoadesivo da
indústria gráfica**



Maringá
2025

MATHEUS LIMA CAMAROTTO

Desenvolvimento de processo de reciclagem de resíduo autoadesivo da indústria gráfica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico, do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador(a): Prof. Dra. Silvia Luciana Favaro

Coorientador(a): Eng. Rafael Henrique Bogo Bexiga

Maringá

2025

COMISSÃO JULGADORA

(orientador/presidente)
(IES de origem)

(nome)
(IES de origem)

(nome)
(IES de origem)

RESUMO

A necessidade que a sociedade tem por soluções eficientes para o descarte correto de resíduos produzidos tem crescido cada vez mais, principalmente os resíduos plásticos, que possuem uma alta complexidade de degradação natural e são produzidos em altas quantidades por cada habitante. Um resíduo que se destaca nessa categoria é o proveniente de indústrias gráficas, conhecidos como aparas, que apresentam na sua composição plásticos, papeis, tinta e cola, sendo um material sem valor econômico e sem uma reciclagem mecânica fácil, principalmente por conta da presença de cola. Para esse fim, tem se buscado processos alternativos de reciclagem para esses materiais com o propósito de destiná-lo de forma correta, como também desenvolver novos materiais com utilidade comercial, atribuindo nova funcionalidade ao material reciclado. Nesse contexto, esse trabalho tem o objetivo desenvolver um processo de reciclagem desses materiais com o propósito de caracterizar e analisar mecanicamente um compósito com matriz de BOPP (Polipropileno Biorientado), que também é um resíduo da indústria gráfica, e reforço de 10, 20 e 30% de aparas em porcentagem de massa, para estudar a viabilidade de substituir os tubetes (cilindros circulares utilizados como falso eixo e armazenamento de filmes de impressão) de papelão usado na indústria gráfica por tubetes fabricados a partir do compósito reciclado. As amostras foram extrudadas e os corpos de prova foram fabricados por injeção e embutimento, sendo eles para os ensaios de: flexão, tração, impacto, dureza, absorção de água e densidade. A caracterização dos materiais foi feita por meio de análises de DSC, TGA, FTIR-ATR, DRX e MEV. Os resultados da caracterização, indicam que a incorporação de aparas gráficas à matriz de BOPP reciclado é viável, uma vez que há satisfatória adesão entre o reforço e a matriz, mesmo aumentando a porcentagem de resíduos. Enquanto os ensaios mecânicos mostram boas propriedades para o compósito em comparação com o papelão, como o aumento da resistência a flexão e do seu módulo elástico, que são maiores que o do papelão e valores próximos entre si de resistência a compressão. Com o estudo analítico, foi possível provar que um tubete feito de compósito consegue suportar a mesma força máxima de cisalhamento que o de papelão aguenta, porém com um diâmetro externo menor, mostrando ser mais resistente. Portanto, o compósito desenvolvido pode, de fato, substituir o material atualmente utilizado na fabricação de tubetes.

Palavras chave: Reciclagem, BOPP, Compósitos.

ABSTRACT

Society's need for efficient solutions regarding the correct disposal of waste has grown increasingly in recent years, especially in relation to plastic waste, as it is produced in high volumes by the population, and has a long degradation time when exposed to nature. Another waste that stands out in this category is that from the printing industry, known as scraps, which contain plastic, paper, ink and glue in their composition, being a material with no economic value and a high degree of complexity and difficulty to be mechanically recycled mainly due to the present glue. To this end, alternative recycling processes have been sought for these materials with the purpose of not only giving them a sustainable disposal, but also developing new materials with commercial utility, giving these wastes a new function. In this context, this work aims to develop a recycling process for these scrap wastes by creating, characterizing and mechanically analyzing a composite with a BOPP (Bioriented Polypropylene) matrix and reinforcement of 10, 20 and 30% of scraps in mass percentage, to study the feasibility of replacing the cardboard tubes (circular cylinders used as a false axis and storage of printing films) used in the graphic industry with tubes manufactured from the recycled composite. The samples were extruded and the test specimens were manufactured by injection and embedding, for the tests of: flexion, traction, impact, hardness, water absorption and density.. The characterization was performed through DSC, TGA, FTIR-ATR, XRD and Scanning Electron Microscopy. The characterization results indicate that incorporating printing scraps into the recycled BOPP matrix is viable, as there is satisfactory adhesion between the reinforcement and the matrix, even with an increase in the percentage of waste. Mechanical tests show that the composite has good properties compared to cardboard, such as increased flexural strength and elastic modulus, which are higher than cardboard's, and similar compressive strength values. The analytical study demonstrated that a composite core can withstand the same maximum shear force as a cardboard core, but with a smaller outer diameter, proving to be more resistant. Therefore, the developed composite can, in fact, replace the material currently used in core manufacturing.

Keywords: Recycling, BOPP, Composites.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo do funcionamento da flexografia.....	11
Figura 2: Produção Física da Indústria Gráfica - Variação no 2º trimestre/24 vs 1º trimestre/24 (dados dessazonalizados).	13
Figura 3: Participação regional na geração brasileira de RSU em 2023.	14
Figura 4: Consumo de resíduos na reciclagem por tipo de artefato plástico.	15
Figura 5: Processos produtivos para a fabricação de transformados plásticos (2022)..	16
Figura 6: Representação de ligação de carbonos.....	17
Figura 7: Polimerização do propileno em polipropileno.	17
Figura 8: Estiramento plano em duas fases.	19
Figura 9: (a) Pellets de BOPP; (b) Aparas gráficas trituradas.....	21
Figura 10: Extrusora MINI LAB II HAAKE; (b) Injetora MiniJEet II HAAKE.....	21
Figura 11: Embutidora metalográfica Manuel Pantec.....	22
Figura 12: Desenho técnico de um tubete de papelão comercial	25
Figura 13: Componente de tensão na superfície normal à direção x.....	26
Figura 14: Curva de aquecimento de DSC para resíduos utilizados.	28
Figura 15: Curva de aquecimento de DSC para resíduos utilizados.	28
Figura 16: Curva de perda de massa de TGA para resíduos utilizados.....	29
Figura 17: Curva de perda de massa de TGA para resíduos utilizados e compósitos fabricados.....	30
Figura 18: Espectro de FTIR-ATR para resíduos utilizados.....	31
Figura 19: Espectro de FTIR-ATR para resíduos utilizados e compósitos fabricados. .	32
Figura 20: Espectro DRX para resíduos utilizados.	33
Figura 21: Espectro DRX para resíduos utilizados e compósitos fabricados.....	34
Figura 22: Imagens de MEV para amostras de a) BOPP, b) PP10, c) PP20 e d) PP30.	35
Figura 23: Gráfico de Absorção de Água para os materiais avaliados.....	36
Figura 24: Corpos de prova de Tração após ensaio.....	37
Figura 25: Gráfico de Limite de Resistência a Tração dos materiais avaliados.....	37
Figura 26: Gráfico de Limite de Escoamento para os materiais avaliados.	38
Figura 27: Gráfico de Módulo Elástico para os materiais avaliados.....	38
Figura 28: Gráfico de Resiliência para os materiais avaliados.....	40
Figura 29: Gráfico de Tenacidade para os materiais avaliados.	40
Figura 30: Corpos de prova de Flexão após ensaio.....	41
Figura 31: Gráfico de Tensão de Flexão para os materiais avaliados.	41
Figura 32: Gráfico de Módulo Elástico de Flexão para os materiais avaliados.	42
Figura 33: Corpos de prova de Impacto após ensaio.....	44
Figura 34: Gráfico de Resistência ao Impacto para os materiais avaliados	44
Figura 35: Gráfico de Dureza para os materiais avaliados.....	46
Figura 36: Gráfico de Resistência a Compressão para os materiais avaliados.....	47
Figura 37: Gráfico de Densidade para os materiais avaliados.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Participação dos Segmentos da Indústria.	12
Tabela 2: Variação das propriedades do polipropileno com aumento da ataticidade. ...	18
Tabela 3: Índices de Cristalinidade dos materiais compósitos pelo método de Segal. ...	34
Tabela 4: Valores de P para o teste de Tukey realizado nos resultados de Tração.	39
Tabela 5: Valores de P para o teste de Tukey realizado nos resultados de Flexão.	43
Tabela 6: Valores de P para o teste de Tukey realizado nos resultados de Impacto.	45
Tabela 7: Valores de P para o teste de Tukey realizado nos resultados de Dureza.	46
Tabela 8: Valores de P para o teste de Tukey realizado nos resultados de Compressão	47
Tabela 9: Valores de P para o teste de Tukey realizado nos resultados de Densidade. .	49
Tabela 10: Valores de limite de escoamento e limite de resistência a tração dos compósitos.	51
Tabela 11: Diâmetro externo dos tubetes feitos dos compósitos.	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIGRAF	Associação Brasileira das Indústrias Gráficas
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASTM	American Society for Testing and Materials
BOPP	Polipropileno Biorientado
DRX	Difração de Raio – X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
FTIR – AR	Espectroscopia do Infravermelho por transformada de Fourier
ISO	Organization for Standardization
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PNRS	Panorama de Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
PP10	Identificação das amostras com 10% de resíduo
PP20	Identificação das amostras com 20% de resíduo
PP30	Identificação das amostras com 30% de resíduo
RSU	Resíduo Sólido Urbano
TGA	Termogravimetria

SUMÁRIO

RESUMO	4
ABSTRACT.....	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	7
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	8
SUMÁRIO	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 Indústria Flexográfica.....	11
2.2 Reciclagem	13
2.3 Polímero	16
2.3.1 Polipropileno	17
2.3.2 Polipropileno Biorientado	19
3 OBJETIVOS.....	20
3.1 Objetivos Específicos	20
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
4.1 Materiais	20
4.2 Preparação das Amostras	21
4.3 Técnicas de caracterização.....	22
4.3.1 Difração de Raio-X (DRX).....	22
4.3.2 Espectroscopia do Infravermelho por Transformada de Fourier.....	23
4.3.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	23
4.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	23
4.3.5 Termogravimetria (TGA)	23
4.3.6 Absorção de Água.....	23
4.4 Ensaio Mecânicos.....	24
4.4.1 Ensaio de Tração.....	24
4.4.2 Ensaio de Flexão	24

4.4.3 Ensaio de Impacto Izod.....	24
4.4.4 Ensaio de Dureza	24
4.4.5 Ensaio de Compressão	24
4.4.6 Análise de densidade.....	25
4.5 Determinação do diâmetro dos tubetes.....	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
5.1.1 Calorimetria Exploratória Diferencial	27
5.1.2 Análise termogravimétrica.....	29
5.1.3 Espectroscopia do Infravermelho por transformada de Fourier.....	30
5.1.4 Difração de Raios-X	33
5.1.5 Microscopia de Varredura.....	35
5.1.6 Absorção de Água	36
5.2 Caracterização Mecânica	37
5.2.1 Ensaio de Tração	37
5.2.2 Ensaio de Flexão.....	41
5.2.3 Ensaio de Impacto Izod	43
5.2.4 Ensaio de Dureza	45
5.2.5 Ensaio de Compressão.....	47
5.2.6 Análise de Densidade	48
5.3 Determinação do diâmetro dos tubetes.....	49
6 CONCLUSÃO.....	53
7 REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A flexografia é um processo de impressão que utiliza uma chapa com relevo, denominada clichê, para determinar quais áreas do filme plástico serão cobertas com tinta. As empresas flexográficas são responsáveis por fornecer adesivos, rótulos e etiquetas para diversos produtos e serviços, e apresentam um crescimento acelerado nos últimos anos devido a diversos fatores, como aumento no consumo de bens e produtos embalados (SCARPETA, 2007).

Uma das matérias-primas mais comuns empregadas na flexografia é o Polipropileno Biorientado (BOPP). Seu principal uso é na fabricação de filmes plásticos, utilizados em embalagens e etiquetas plásticas, sendo empregado principalmente pela indústria alimentícia devido a sua alta qualidade como embalagem para os produtos, além de permitir a impressão direta no filme plástico, garantindo um forte apelo visual ao consumidor. (WITTMANN e colab., 2017). A fabricação de adesivos e embalagens por meio do processo de flexografia gera uma grande quantidade de resíduos plásticos e de papéis misturados com cola. Dentro da indústria esse resíduo é conhecido como aparas e não possui nenhum tipo de reciclagem ou reaproveitamento, principalmente por apresentar uma grande dificuldade na sua moagem e separação, por conta da cola existente nesse material. Atualmente, sua única forma de descarte é a separação e coleta para destinação em aterros sanitários, muitas vezes feita de forma inadequada (MANTOVANI e colab., 2017). Uma empresa de pequeno porte, como a INOVAFLEX Rótulos e Etiquetas, empresa parceira desse trabalho, gera aproximadamente 5 toneladas de resíduos por mês.

Como uma forma de reutilizar os resíduos da indústria gráfica, foi proposto um estudo para entender a viabilidade de fabricar tubetes, tubos de diâmetros variados, normalmente fabricados em lâminas de papel prensado, com um formato de tubo ou canudo, sendo esse material já utilizado como falso eixo de encaixe para maquinários, para processos de automação de embalagens, bem como para armazenamento e transporte do produto aos clientes. Dessa forma, esse resíduo não precisaria ser descartado nos aterros sanitários e seria possível gerar a partir dele um produto de valor agregado, como também utilizá-lo na própria indústria, fechando um ciclo de reciclagem.

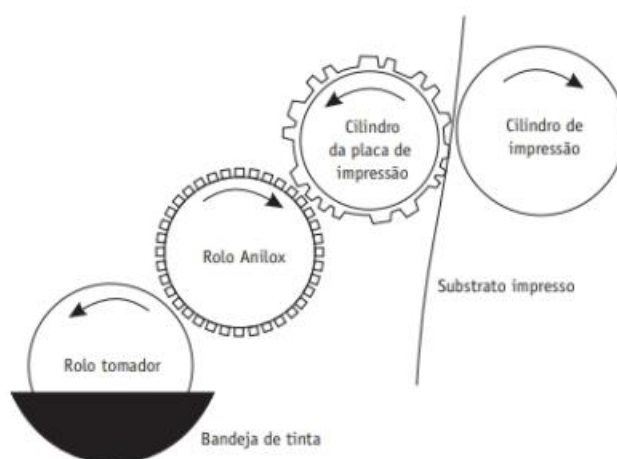
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Indústria Flexográfica

A flexografia faz parte de uma categoria de impressão conhecida como *roll to roll*, na qual a tinta passa por um processo de transferência contínua de rolo para rolo até a impressão em folhas. Outros exemplos dessa categoria de impressão seriam a rotogravura e a *offset*. A importância da flexografia se dá principalmente pela sua alta produtividade e o baixo custo de produção de materiais (ASSAIFAN e colab., 2020).

Esse processo surge em meados da década de 30 do século XX, pela empresa *Mosstype Corporation* que é responsável pelo desenvolvimento das chapas de impressão. Seu princípio era a entipagem do clichê de borracha com uma tinta à base de anilina. Após alguns anos, o processo foi aprimorado e começou a usar um cilindro gravado com diversas células que retinham a tinta e à transferiam de forma mais controlada (SCARPETA, 2007). Algumas das vantagens do processo flexográfico é a sua ampla variedade de tintas com variações de viscosidades, bem como uma produção contínua de impressão em linhas uniformes que podem ser orientadas de acordo com a necessidade da aplicação (ASSAIFAN et al., 2020).

Figura 1: Processo do funcionamento da flexografia.



Fonte: ANYADIKE, 2010.

Essa técnica facilita a impressão em diversos tipos de materiais, podendo variar o formato de maneira mais livre e imprimir desde etiquetas e rótulos até sacolas plásticas, bem como embalagens (SCARPETA, 2007), fator esse possível também por conta de

recursos e avanços da computação empregados na indústria gráfica, aumentando a capacidade de aplicação de ideias na divulgação do produto (WITTMANN e colab., 2017). Como o uso de embalagens tem crescido cada vez mais e são usadas para promover uma identidade visual, com o propósito de transmitir mensagens importantes sobre a marca, a rotulagem se beneficia do uso da flexografia por sua qualidade (ANYADIKE, 2010) como também serve de apoio ao consumidor para ter as informações necessárias sobre o produto comprado, garantindo qualidade e saúde, como é obrigatório pela legislação da ANVISA.

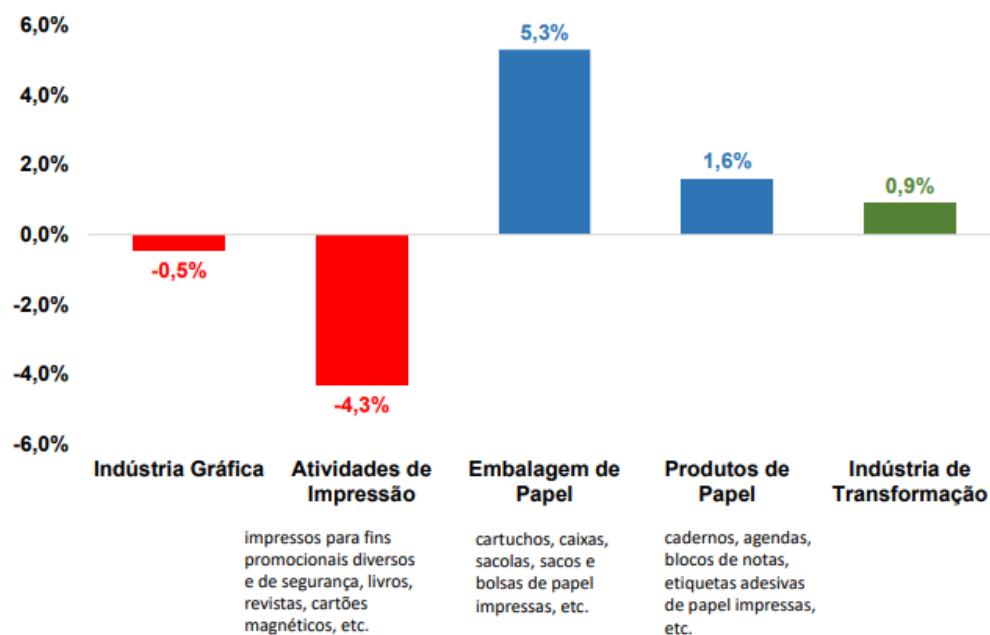
De acordo com a ABIGRAF Nacional, em uma análise feita em setembro de 2024, apresentada na Tabela 1, o ramo gráfico participa de 49% da produção total de embalagens, ao passo que rótulos e etiquetas compõem 5% do total de embalagens confeccionadas. E, enquanto atividades de impressão como livros e revistas tiveram uma queda de produção entre o primeiro e o segundo semestre, ramos de embalagens de papel impresso obtiveram um aumento de 5,3% e produtos de papel, como etiquetas adesivas impressas, um aumento de 1,6%, como aponta a Figura 2.

Tabela 1: Participação dos Segmentos da Indústria.

Segmentos da Indústria Gráfica Brasileira	Participação no Setor de Produção (%)
Embalagens	49,0
Editorial - Publicações (livros, revistas etc)	21,0
Impressos Promocionais	8,0
Impressos de segurança/Fiscais/Formulários	7,0
Rótulos e Etiquetas	5,0
Cartões Transacionais (banco, crédito etc)	3,9
Pré-impressão	3,1
Cadernos	2,9
Envelopes	0,1
Total da Indústria Gráfica	100,0

Fonte: Adaptado de ABIGRAF Nacional (2024).

Figura 2: Produção Física da Indústria Gráfica - Variação no 2º trimestre/24 vs 1º trimestre/24 (dados dessazonalizados).



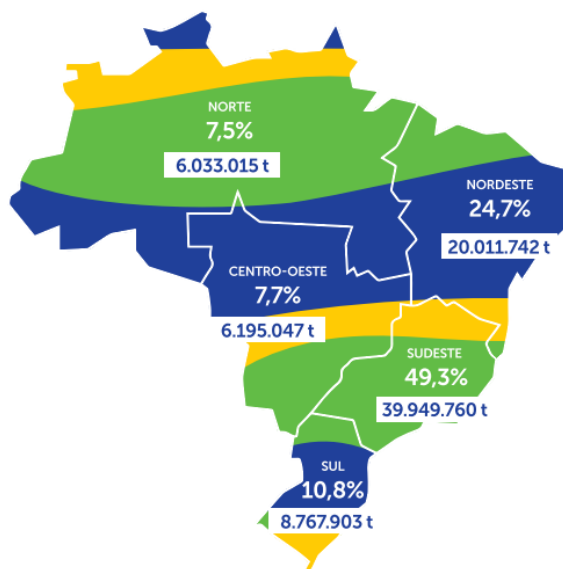
Fonte: Adaptado de ABIGRAF Nacional (2024).

2.2 Reciclagem

O panorama de resíduos sólidos produzidos no Brasil, apresentado em 2024, mostra que o país gerou em 2023, aproximadamente 81 milhões de toneladas de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos), apontando a região Sudeste como a maior geração, com 49,3 % da produção total e a Região Sul, como a menor em geração *per capita*, com uma produção de 264 kg por habitante por ano (ABREMA, 2024).

Nesse contexto, a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA) diz que o Brasil passa por um processo de transição, no qual o sistema de descarte inapropriado de RSU no solo, passa a ser remodelado para um mais sustentável, incorporando no processo outras formas de tratamento e aproveitamento desses materiais. A Figura 3 apresenta o total de RSU gerados no Brasil, e a região sul se destaca como a responsável pelo maior índice de geração.

Figura 3: Participação regional na geração brasileira de RSU em 2023.



Fonte: ABREMA (2024).

Do montante produzido de RSU, estima-se que 6,7 milhões de toneladas de material seco foram enviados para a reciclagem em 2023, possuindo duas fontes principais de origem: coleta pública e informal. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) diz que tendo esgotado todas as formas de tratamento e recuperação por processos disponíveis e viáveis economicamente, os resíduos sólidos não apresentam outra possibilidade a não ser disposição final adequada, sendo ela um aterro sanitário que segue criteriosamente a regulamentação garantindo saúde pública e segurança.

Olhando para esse cenário a reciclagem aparece como um fator primordial na reutilização desses resíduos sólidos, com um propósito ecológico e de sustentabilidade. Dos diversos resíduos produzidos pela humanidade, pode se dizer que a grande maioria é proveniente de embalagens. Em 2023, teve-se um consumo de 1,4 milhões de toneladas de resíduos plásticos, sendo 984 mil vindo de embalagens (ABIPLAST, 2023), como mostra a Figura 4.

Figura 4: Consumo de resíduos na reciclagem por tipo de artefato plástico.



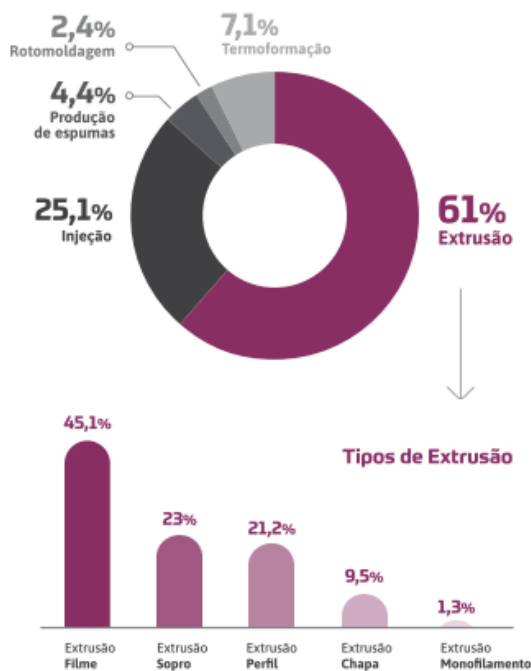
Fonte: acesso em < <https://www.abiplast.org.br/noticias/reciclagem-de-plasticos-no-brasil-estudo-aponta-indice-de-243-para-as-embalagens-em-2023/>>.

A reciclagem de plásticos acontece por de três métodos: mecânica, química e energética. A reciclagem mecânica é o processo mais utilizado para materiais plásticos, na qual o resíduo polimérico passa por processos de seleção, moagem, lavagem, secagem, aglutinação e reprocessamento, dando origem a grânulos ou uma peça pronta reciclada. A química já ocasiona a despolimerização do polímero, quebrando a estrutura polimérica da cadeia e a energética acontece quando o plástico passa por um processo de combustão (Zanin; Mancini, 2009). O processo de reciclagem mecânica é mais comumente utilizado para plásticos rígidos, visto que a grande maioria dos resíduos plásticos em forma de filme, são de resíduos urbano, logo estão sujos e contaminados por conta da dificuldade da separação correta. Isso dificulta a reciclagem desse material por conta do processo extra necessário de lavagem do mesmo (ZANIN; MANCINI, 2009b). De acordo com a ABIPLAST, o índice de reciclagem mecânica dos plásticos pós consumo em 2023 no Brasil, chega em 20,6% e o índice de reciclagem mecânica de embalagens chega em 24,4%.

Dessa forma, com a utilização da reciclagem mecânica, o resíduo selecionado e devidamente preparado é triturado e passa por um processo de extrusão, fundindo e homogeneizando. Assim, em seguida, o material é picotado em *pellets* e podem ser utilizados em injetoras para a produção de novos produtos (AUGUSTO MANTOVANI, 2015). De acordo com a ABIPLAST, o processo de extrusão foi o meio de reciclagem

mecânica mais utilizado para a produção de transformados plásticos em 2022, como mostrado na Figura 5.

Figura 5: Processos produtivos para a fabricação de transformados plásticos (2022).



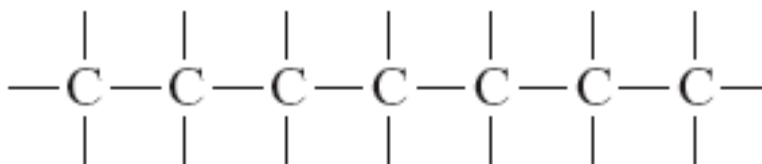
Fonte: adaptado de ABIPLAST (2023).

2.3 Polímero

Polímeros são usados pela humanidade desde muito tempo, tendo começado com a utilização dos naturais, como algodão e lã. A partir da Segunda Guerra Mundial, se iniciou um avanço tecnológico com o surgimento dos polímeros sintéticos, que são sintetizados a partir de moléculas orgânicas pequenas, na maioria das vezes hidrocarbonetos (compostos com hidrogênio e carbono)(JUNIOR; RETHWISH, 2020).

Analisando polímeros com cadeias de carbono, há uma longa quantidade de átomos em série que se ligam entre si por ligações simples a dois átomos adjacentes (Figura 6) e que possuem elétrons de valência disponíveis para serem envolvidos por ligações laterais a outros átomos ou radicais (JUNIOR; RETHWISH, 2020).

Figura 6: Representação de ligação de carbonos.



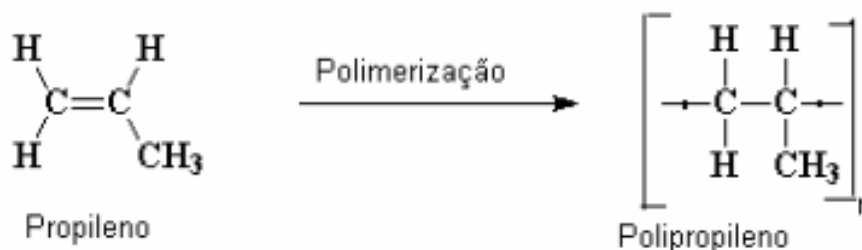
Fonte: adaptado de Junior, Rethwish 2020.

A produção do polímero acontece quando monômeros sofrem alterações para formar meros, que são as unidades repetitivas que geram as longas cadeias poliméricas (MEDEIROS, 2005). Uma das formas de classificar os polímeros é a sua relação com elevadas temperaturas, podendo separá-los em termoplásticos e termofixos. Os Termoplásticos amolecem quando aquecidos e endurecem quando resfriados, podendo ser um processo repetido, ou seja, totalmente reversível. Enquanto os Termofixos ficam permanentemente rígidos e não amolecem durante o seu aquecimento, sendo em geral mais duros e resistentes quando comparados aos termoplásticos (JUNIOR; RETHWISH, 2020).

2.3.1 Polipropileno

O Polipropileno (PP) é um polímero termoplástico, de cor branca e opaca. Possui um baixo custo e apresenta boas propriedades, como por exemplo uma resistência moderada (TOLENTINO RODRIGUES, 2020). É produzido através da polimerização do gás propileno, oriundo da refinação do petróleo, separando os seus componentes por ação do calor (BARBOSA CARVALHO, 2007), como mostra a Figura 7.

Figura 7: Polimerização do propileno em polipropileno.



Fonte: adaptado de Barbosa Carvalho, 2007.

A cadeia do Polipropileno apresenta uma série de carbonos assimétricos, baseado na posição do radical (CH_3): estando do mesmo lado da cadeia é denominado isotático, quando dispostos alternadamente são denominados sindiotático e sem periodicidade na disposição dos radicais são denominados atáticos. Para aplicação industrial o polipropileno isotático é o que possui maior aplicação, geralmente com uma pequena mistura de polipropileno atático. A Tabela 2 mostra a influência nas propriedades do polipropileno com um aumento da fração de polipropileno atático (AUGUSTO MANTOVANI, 2015).

Tabela 2: Variação das propriedades do polipropileno com aumento da ataticidade.

Propriedade	Aumento da fração atática
Rigidez	Diminui
Resistência	Diminui
Resistência ao impacto à Temperatura ambiente	Aumenta
Alongamento	Aumenta
Tolerância a radiação	Aumenta
Solubilidade	Aumenta
Temperatura de amolecimento	Diminui
Temperatura de fusão	Diminui
Temperatura de cristalização	Diminui

Fonte: Augusto Mantovani, 2015.

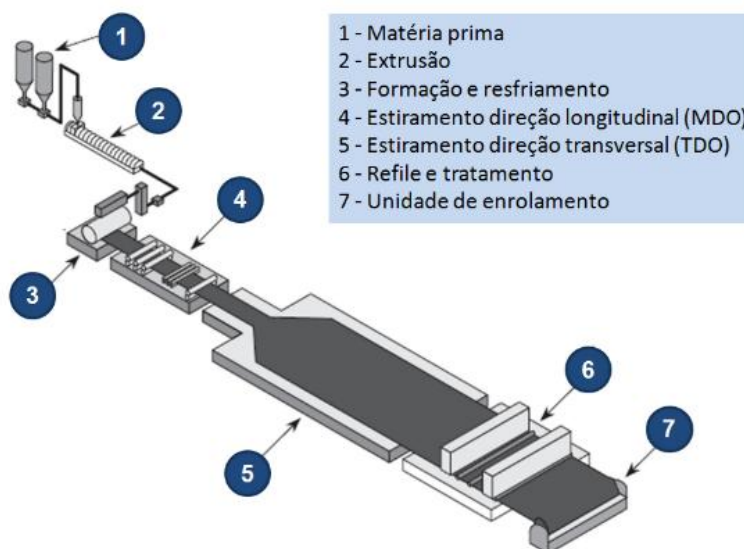
Em 2023 de acordo com a ABIPLAST, 19,7% dos plásticos consumidos no Brasil foram PP, sendo ele o mais consumido e muito utilizado em indústrias automobilísticas e em produtos de consumo, como embalagens. Uma das grandes vantagens desse polímero é a sua utilização como matriz para a produção de compósitos, por apresentar, boa disponibilidade e processabilidade, bem como propriedades mecânicas importantes (TOLENTINO RODRIGUES, 2020).

2.3.2 Polipropileno Biorientado

O polipropileno Biorientado, conhecido como BOPP, pode ser fabricado por 3 processos diferentes: estiramento simultâneo, sopro em dupla camada e estiramento plano em duas fases. Sendo o primeiro, o processo menos utilizado e o último com a maior importância industrial e responsável por 90% da produção do BOPP (BARBOSA CARVALHO, 2007).

O processo de estiramento plano em duas fases ocorre como apresentado na Figura 8, a matéria prima passa por um processo em uma matriz de conformação, sendo resfriada em água a uma temperatura controlada, garantindo orientação e cristalinidade adequada para o filme. Após isso, o filme é estirado longitudinalmente, item número 4, e logo após é estirado transversalmente, item 5. Nesses dois processos, o filme passa por seções de pré-aquecimento, estiramento e relaxamento. Por fim, o filme é refilado e enrolado (AUGUSTO MANTOVANI, 2015).

Figura 8: Estiramento plano em duas fases.



Fonte: Augusto Mantovani, 2015.

O filme de BOPP, com enfoque nos metalizados, apresenta boas propriedades mecânicas e barram os gases e a umidade, sendo ótimos para a produção de materiais laminados com espessuras reduzidas. Dessa forma, o filme metalizado com BOPP tem sido muito utilizado no mercado sendo aplicado, por exemplo, para confecção de

embalagens e papeis de embrulho, com foco maior na utilização para embalagens de alimentos (SOARES e colab., 2023)

3 OBJETIVOS

Desenvolver um processo de reciclagem para resíduos da indústria gráfica, por meio de um compósito para a fabricação de um tubete que seja capaz de suportar os esforços necessários para a sua aplicação.

3.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos serão:

- Preparar compósitos de BOPP puro e com reforço de aparas nas porcentagens de massa de 10, 20 e 30%;
- Analisar as características mecânicas do material por meio dos ensaios de: tração, flexão, compressão, impacto, dureza e densidade;
- Realizar a caracterização físico-química dos materiais por DRX, DSC, TGA, FTIR-ATR, MEV e absorção de água;
- Determinar a espessura e o diâmetro do tubete feito com o compósito;

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

O compósito foi fabricado usando como matriz o polipropileno biorientado (BOPP) reciclado em forma de *pellets* (Figura 9: (a)). Para o reforço foi utilizado resíduo da indústria flexográfica, composto por papel, resto de tinta, polipropileno biorientado e cola a base de poliuretano, denominado de aparas (Figura 9: (b)). Também foi utilizado o papelão, direto dos tubetes utilizados pela indústria, para a confecção de corpos de prova. Ambos os resíduos (e também os tubetes de papelão) foram fornecidos pela empresa INOVAFLEX Rótulos e Etiquetas LTDA e triturados em um moinho tipo *Shredder*.

Figura 9: (a) Pellets de BOPP; (b) Aparas gráficas trituradas

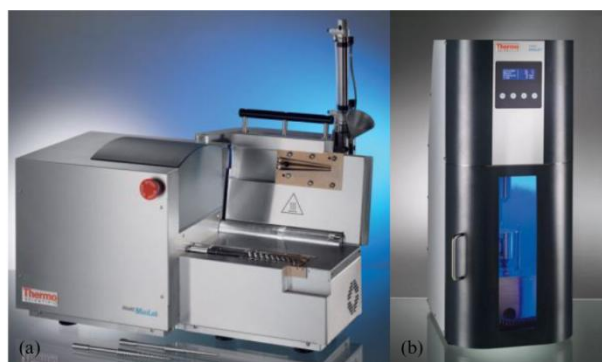


Fonte: O Autor (2025).

4.2 Preparação das Amostras

O material usado nesse estudo foi um compósito fabricado com matriz de BOPP com cargas de aparas. As análises foram feitas com o BOPP puro e as misturas com 10, 20 e 30% de aparas, sendo as amostras fabricadas em uma extrusora Thermo Scientific, modelo MINI LAB II HAAKE Rheomex de parafusos cônicos duplos, na configuração co-rotante a 190°C e 100 RPM, com um tempo de circulação de 5 minutos (Figura 10: (a)), e moldadas por meio da injetora Thermo Scientific, modelo MiniJEet II HAAKE a 200°C com tempo de injeção de 15 segundos em um molde a 50°C (Figura 10: (b)). Os corpos de provas para os ensaios de tração, flexão, impacto, dureza e absorção de água foram produzidos dessa forma. Para cada compósito foi produzido 8 corpos de prova.

Figura 10: Extrusora MINI LAB II HAAKE; (b) Injetora MiniJEet II HAAKE.



Fonte: Adaptado de THERMOSCIENTIFIC (2025).

Os corpos de prova para o ensaio de compressão tiveram uma preparação diferente visto que foram embutidos em uma Embutidora metalográfica Manuel Pantec, modelo

PANPRESS – 30 a 200 °C (Figura 11), com uma aplicação de força constante de 2 *kgf*, em uma hora de aquecimento, com controle de pressão aplicada, 10 minutos sobre pressão e finalmente resfriando-o por mais 10 minutos sem aplicação de pressão. Foram produzidos 3 corpos de provas para cada porcentagem, feitos da mesma forma que os demais na extrusora, porém em fitas de aproximadamente 2,2 *g* até formar 18,6 *g*, posteriormente picotadas em tamanhos menor, suficiente para fazer 3 corpos de provas com 6,2 *g* cada. Também foram fabricados os corpos de provas de papelão, cortando eles do próprio tubete comercial utilizado na indústria.

Figura 11: Embutidora metalográfica Manuel Pantec.



Fonte: O Autor (2025).

4.3 Técnicas de caracterização

4.3.1 Difração de Raio-X (DRX)

A difração de Raios-X foi realizada em um equipamento Shimadzu 7000, com um ângulo de análise de 10° a 40°, com fonte de cobre, a uma velocidade de 2,0 °/min. O índice de cristalinidade (IC%) foi determinado a partir do método de Segal, indicado na Equação 1:

$$IC(\%) = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100\% \quad (1)$$

Onde I_{002} é a intensidade máxima do pico de difração referente à região cristalina

localizado em $2\theta \approx 14^\circ$, e I_{am} é a intensidade mínima do pico de difração referente à região amorfa, localizado em $2\theta \approx 21^\circ$.

4.3.2 Espectroscopia do Infravermelho por Transformada de Fourier

O FTIR foi realizado por meio de um equipamento Lumus II Bruker, utilizando um cristal de diamante para analisar frequências de infravermelho de 650 à 4000 cm^{-1} .

4.3.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

O DSC foi realizado de forma a se obter a temperatura de fusão e cristalização dos materiais, por meio de um equipamento NETZSCH STA 449F5. Foram utilizadas massas de 5,00 mg de BOPP puro, 5,00 mg de aparas e 5,00 mg para cada compósito, com aquecimento de 10 °C/min com uma atmosfera de nitrogênio a 50,00 mL/min.

4.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Foi utilizado um equipamento Shimadzu SS-550 para se obter imagens de microscopia eletrônica da região de fratura dos corpos de prova de impacto, utilizando ampliações de 100, 500 e 1000 vezes.

4.3.5 Termogravimetria (TGA)

A análise de termogravimetria foi realizada em amostras de 5,00 mg para BOPP puro, 5,00 mg para aparas e 5,00 mg para cada compósito, em um equipamento NETZSCH STA 449F5 a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min de 25 °C até 650 °C com atmosfera de nitrogênio a uma taxa de 50,00 mL/min.

4.3.6 Absorção de Água

Os ensaios de absorção de água foram realizados de acordo com a norma ASTM D570. Secos em uma Estufa da LUCADEMA por 24h em uma temperatura de 50° ($\pm 3^\circ C$) e logo após a retirada foram imediatamente pesados. Após isso, ficaram em banho maria, equipamento Banho Ultra termostático QUIMIS, por 24h em uma temperatura de 23°C ($\pm 3^\circ C$). Após esse tempo foram secados superficialmente e imediatamente pesados.

4.4 Ensaios Mecânicos

4.4.1 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal EMIC DL 10000 com uma célula de carga de 5000 N e garras auto-travantes com efeito alavanca, de acordo com a norma ASTM D638. Foi utilizado uma velocidade de ensaio de 10mm/min e o ambiente controlado com uma temperatura de 24,5°C com 50% de umidade.

4.4.2 Ensaio de Flexão

Os ensaios de flexão foram realizados em uma máquina universal EMIC DL 10000 com uma célula de carga de 5000 N, com uma distância entre os apoios de 50 mm de acordo com a norma ISO-178. A velocidade de ensaio utilizada foi de 10 mm/min ou até o limite de deformação de 30 mm fosse atingido e o ambiente controlado com uma temperatura de 24,5°C com 50% de umidade.

4.4.3 Ensaio de Impacto Izod

Os ensaios de impacto foram realizados em uma máquina Resil Impacto Junior da CEAST com um martelo de 2,75 J de acordo com a norma ASTM D256. Os corpos de prova foram fabricados sem os entalhes e feitos posteriormente com uma máquina de entalhe CEAST Notchvis no formato de V com uma profundidade de 2 mm. O ensaio foi realizado em um ambiente controlado com uma temperatura de 24,5°C e 50% de umidade.

4.4.4 Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza foram realizados utilizando um Durômetro modelo Taphet 0-110HD na Escala D de acordo com a norma ASTM-D2240. Uma carga foi aplicada em 5 pontos distintos e equidistantes sobre a superfície dos corpos de prova dos compósitos e do papelão.

4.4.5 Ensaio de Compressão

Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina universal EMIC DL 10000 com uma célula de carga de 20000 N e pratos de compressão, de acordo com a

normal ASTM D695. Foi utilizada uma velocidade de ensaio de 1,0 mm/min e as análises foram feitas em um ambiente controlado com temperatura de 24,5 °C e 50% de umidade.

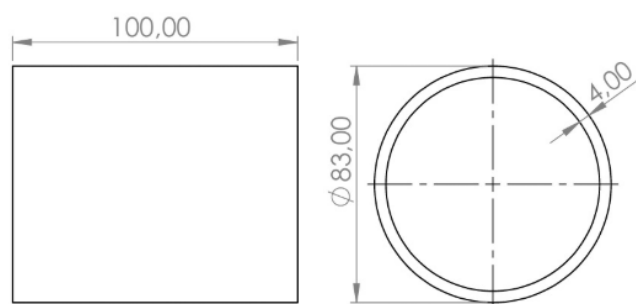
4.4.6 Análise de densidade

A densidade do material foi obtida por meio de picnometria com um Picnômetro tipo Hubberd Cônico de 25 mL, utilizando álcool isopropílico como fluido comparativo. O ensaio foi realizado a temperatura ambiente controlada de 24,5 °C com 50% de umidade, utilizando dois corpos de prova por amostra, totalizando 20 medições por material.

4.5 Determinação do diâmetro dos tubetes

Para a análise do comportamento de um tubete feito a partir dos compósitos fabricados, foi feita uma adaptação da norma ISO 11093-6, que expõe como determinar a resistência a flexão do material pelo método de três pontos. Foi considerado o modelo apresentado na Figura 12, que representa um tubete de tamanho comercial utilizado pela indústria. Para a análise, foi adicionada uma força pontual no centro do tubete de papelão, representando a força máxima que ele suporta antes do cisalhamento.

Figura 12: Desenho técnico de um tubete de papelão comercial

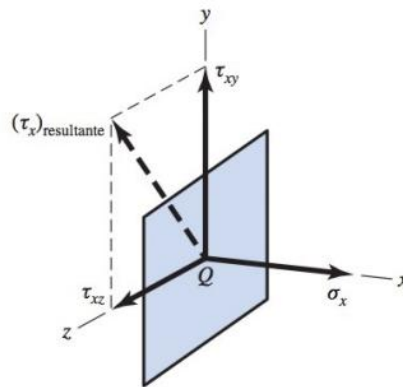


Fonte: O Autor (2025).

De acordo com BUDYNAS (2016) quando há isolamento de uma superfície interna, atua-se nessa superfície uma força e um momento resultante que agem distribuindo força ao longo de toda a área. Essa distribuição apresenta uma componente na direção normal e tangencial, denominadas, respectivamente, por tensão normal e tensão de cisalhamento tangencial. BUDYNAS (2016), ainda afirma que as tensões possuem suas componentes cartesianas, de tal forma que cada superfície possui uma

tensão normal representada pela letra σ , que é acompanhada por um subscrito (x, y ou z) responsável por indicar a direção normal. Tem-se também, a tensão de cisalhamento resultante atuante na superfície, indicada pela letra τ e que pode ser decomposta nas direções y e z, representando-as respectivamente, por τ_{xy} e τ_{xz} , sendo necessário dois subscritos para representa-la: o primeiro na direção da superfície normal e o segundo mostrando a direção da tensão de cisalhamento.

Figura 13: Componente de tensão na superfície normal à direção x.



Fonte: (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

Fazendo as devidas modificações na análise das tensões, podemos representá-las nas duas tensões principais, indicadas na Equação (2).

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2)$$

em que:

- σ_1 e σ_2 : Tensões principais (MPa)
- σ_x e σ_y : Tensão normal no eixo x e y respectivamente
- τ_{xy} : Tensão de cisalhamento, dada pela Equação (3)

$$\tau_{xy} = \frac{T * r}{J} \quad (3)$$

em que:

- T: Torque (N.m)
- r: Raio externo (m)

- J: Segundo momento polar de área, que para o caso de um tubo vazado é dado pela Equação (4)

$$J = \frac{\pi}{32} * (D_e^4 - d_i^4) \quad (4)$$

em que:

- D_e : Diâmetro externo (m)
- D_i : Diâmetro interno (m)

Por fim, o método utilizado para encontrar a força de cisalhamento foi o de Coulomb-Mohr para materiais frágeis, representado pela Equação (5):

$$\frac{\sigma_A}{S_{ut}} - \frac{\sigma_B}{S_{uc}} = \frac{1}{n} \quad (5)$$

em que:

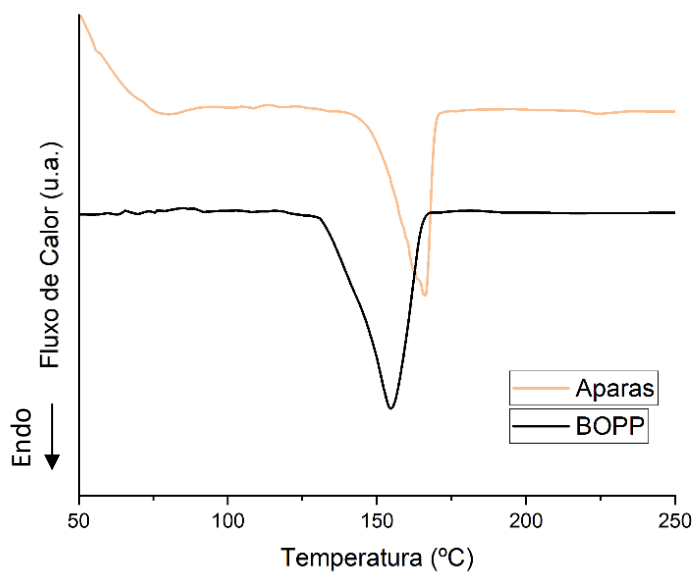
- S_{ut} : Limite de escoamento (MPa)
- S_{uc} : Limite de resistência a tração (MPa)
- n : fator de segurança

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1.1 Calorimetria Exploratória Diferencial

A Figura 14 apresenta os resultados obtidos no ensaio de DSC para os resíduos pré-processamento. O polipropileno biorientado reciclado (BOPP) apresenta um pico endotérmico em 155 °C, já as aparas apresentaram um pico em 164°C. O ponto de fusão de ambos os materiais se encontra dentro da faixa característica do ponto de fusão do polipropileno ((ROHIT; DIXIT, 2016) e (BRODA e colab., 2020)). A diferença entre os valores de temperatura pode ser atribuída ao histórico térmico do material reaproveitado. Durante o processo de reciclagem, o BOPP é submetido a múltiplos ciclos de aquecimento em temperaturas elevadas, promovendo a degradação de suas cadeias poliméricas e alterando suas propriedades térmicas, resultando na redução do ponto de fusão em relação ao polipropileno virgem. ((DE SOUZA e colab., 2011)).

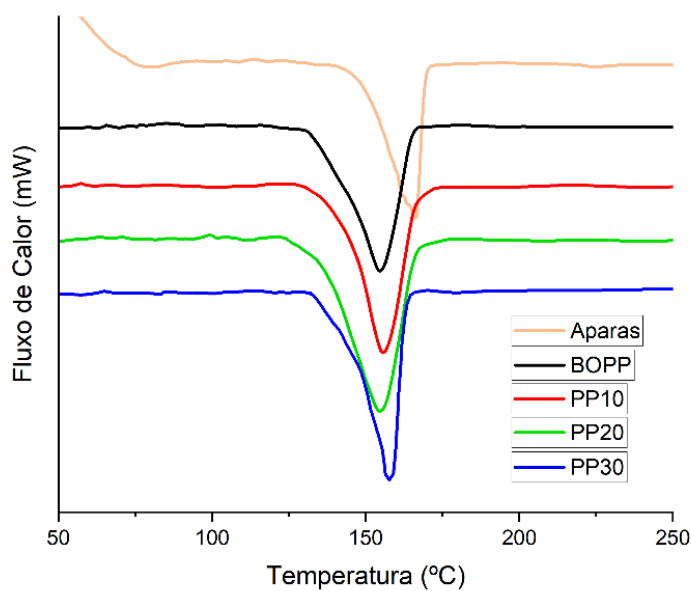
Figura 14: Curva de aquecimento de DSC para resíduos utilizados.



Fonte: O Autor (2025).

Os resultados de DSC para os materiais compósitos podem ser observados na Figura 15, sendo comparados com as curvas de aquecimento dos resíduos.

Figura 15: Curva de aquecimento de DSC para resíduos utilizados.



Fonte: O Autor (2025).

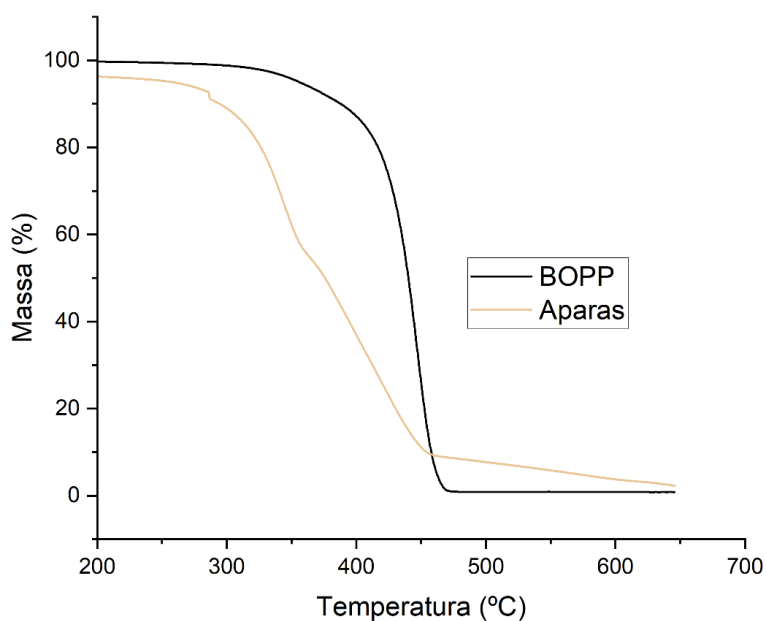
Pode-se observar que os picos endotérmicos, característicos da fusão do material, se mantêm em torno de 155 °C, corroborando os resultados obtidos na análise prévia dos resíduos, indicando que mesmo com uma alta quantidade em massa de aparas

no material compósito, seu comportamento térmico ainda se assemelha ao do polipropileno biorientado.

5.1.2 Análise termogravimétrica

A análise TGA foi utilizada para investigar o comportamento térmico dos resíduos. A Figura 16 representa as curvas de termogravimetria (TG) para o polipropileno biorientado e aparas gráficas. O BOPP possui uma maior estabilidade térmica em comparação às aparas, em que a velocidade de perda de massa máxima ocorre em 420°C, típico do polipropileno ((LÍBANO, 2012). As aparas apresentaram um comportamento característico de materiais celulósicos, com três etapas distintas de perda de massa ao longo do aquecimento. De acordo com GARCIA (2016) a celulose sofre decomposição em torno de 300°C, seguido da degradação da lignina na faixa de 350°C a 500°C.

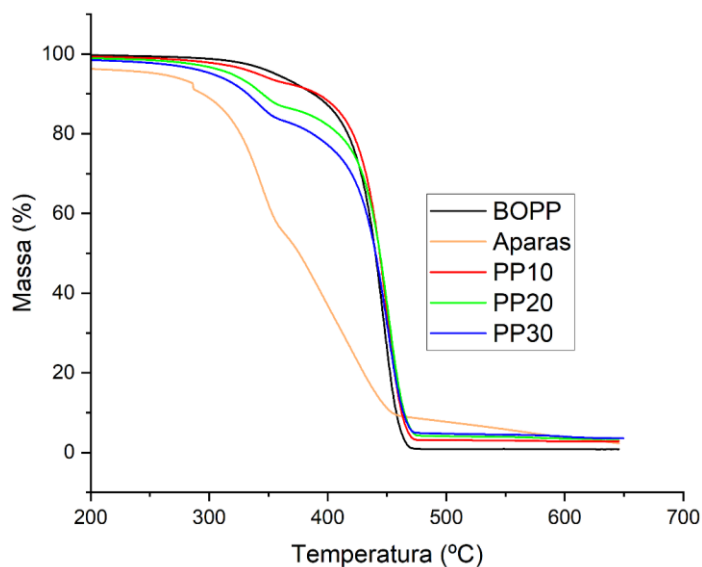
Figura 16: Curva de perda de massa de TGA para resíduos utilizados.



Fonte: O Autor (2025).

Para os materiais compósitos, as curvas de massa por temperatura extraídas do ensaio de TG estão apresentadas na Figura 17:

Figura 17: Curva de perda de massa de TGA para resíduos utilizados e compósitos fabricados.



Fonte: O Autor (2025).

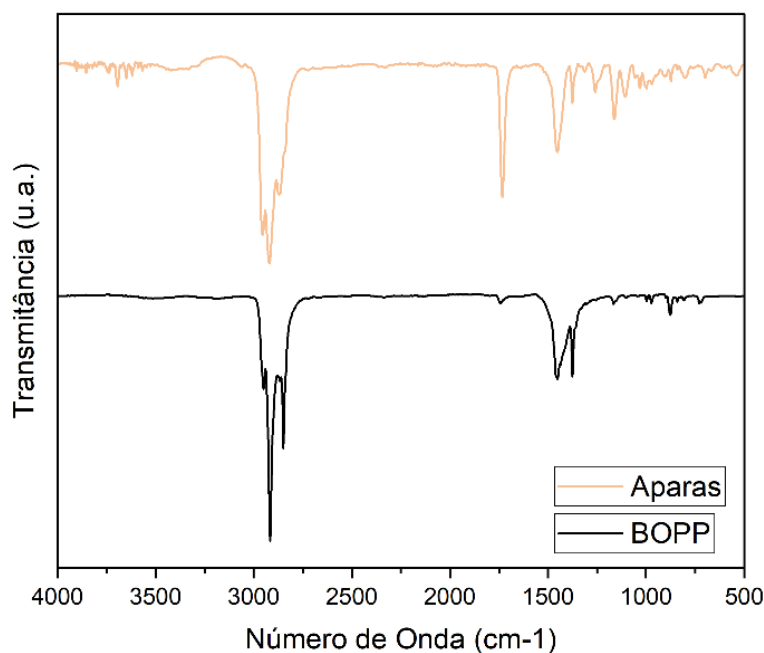
Os compósitos apresentaram perfis de TG semelhantes ao do BOPP reciclado, porém com a presença progressivamente mais acentuada das etapas de degradação características das aparas, cuja distinção se torna mais prevaiente conforme o teor de reforço aumenta na matriz polimérica. Observa-se também que a adição das aparas gráficas não compromete significativamente a estabilidade térmica dos compósitos, dado as curvas respectivas às amostras de PP10, PP20 e PP30 apresentaram a principal perda de massa em temperaturas próximas, na faixa de 410 °C a 430 °C.

As curvas de termogravimetria (TG) dos compósitos indicaram a presença de uma massa residual acima de 450 °C que se mostrou proporcionalmente crescente com o aumento da quantidade de aparas adicionadas ao material. Essa variação é atribuída à presença de componentes inorgânicos nos resíduos gráficos, que apresentam elevada estabilidade térmica e não se decompõem totalmente nas faixas de temperatura avaliada.

5.1.3 Espectroscopia do Infravermelho por transformada de Fourier

O ensaio de FTIR-ATR foi realizado nas amostras de resíduos pré processamento, e os espectros obtidos podem ser observados na Figura 18:

Figura 18: Espectro de FTIR-ATR para resíduos utilizados.



Fonte: O Autor (2025).

Os espectros obtidos para o BOPP reciclado e as aparas gráficas apresentam muitas similaridades. Esse resultado já era esperado, levando em consideração que as aparas gráficas são compostas, em sua maior parte, de filmes de polipropileno biorientado. A presença de bandas distintas entre os espectros se dá devido a presença de outros materiais no resíduo gráfico.

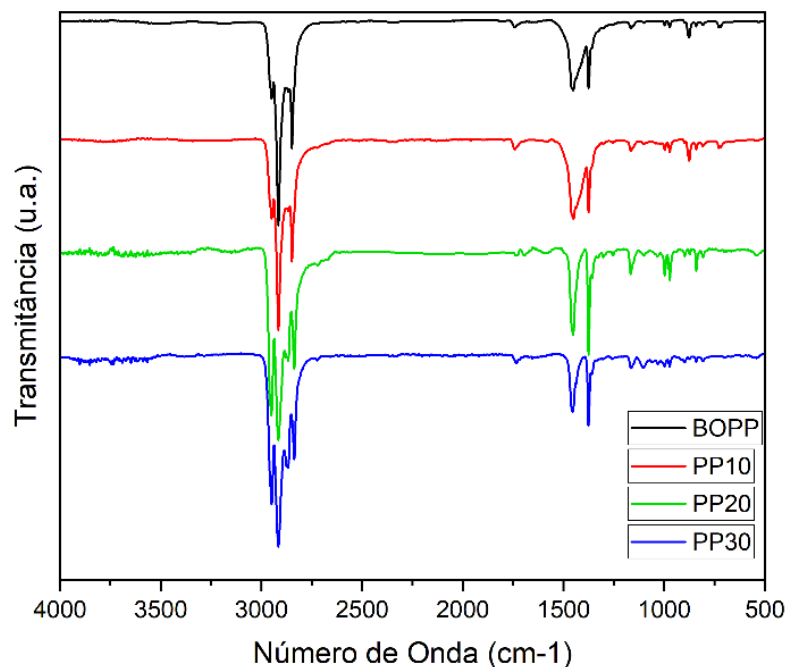
Os espectros FTIR-ATR também se mostraram similares aos encontrados por DING (2020) e RANJBAR (2016) com bandas pronunciadas em 2952 e 2872 cm^{-1} típicos de vibrações simétricas e assimétricas do CH_3 , assim como bandas em 2920 e 2840 cm^{-1} , associadas a vibrações de grupos CH_2 . O BOPP ainda apresentou bandas de absorção em 1457 e 1379 cm^{-1} , atribuídas a ligações angulares (tipo tesoura) de CH_2 e CH_3 respectivamente. Já as absorções fracas entre 800-1200 cm^{-1} representam bandas de absorção de ligações C-C, CH_3 e C-H.

Além disso, nota-se a presença de uma banda em 1700 cm^{-1} em ambos os espectros, indicativo de grupos carbonila. A intensidade dessa banda se destaca no espectro das aparas, devido a presença de celulose, um grupo rico em ligações carbonila, nos resíduos gráficos (GARCIA, 2016)). A presença da pequena banda no BOPP reciclado é causada pelo efeito de oxidação no polipropileno, acentuado quando exposto à alta temperatura

dos processos de fabricação utilizados para sua reciclagem (PIRES, 2019).

Os espectros do infravermelho obtidos para as amostras de compósitos foram alocados na Figura 19, em comparação com os espectros obtidos para os resíduos.

Figura 19: Espectro de FTIR-ATR para resíduos utilizados e compósitos fabricados.



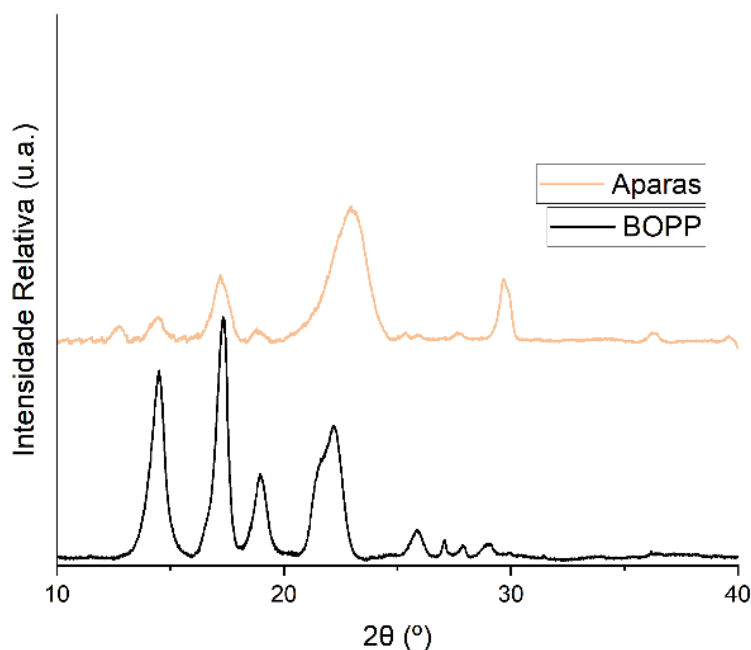
Fonte: O Autor (2025).

Analisando os espectros obtidos para os materiais compósitos, pode-se observar um aumento da banda característico do grupo carbonila nos compósitos em relação ao espectro do BOPP reciclado. Esse resultado é consistente com análises anteriores, visto que a inclusão de aparas como reforço aumentaria a quantidade de celulose no material. Se destaca também a presença de pequenas bandas entre 3500 e 4000 cm^{-1} e entre 500 e 1000 cm^{-1} nos compósitos. Essas bandas se devem a inclusão de material de reforço, visto que as aparas gráficas possuem em sua composição não somente BOPP e celulose, como também cola a base de poliuretano e tintas a base de álcool. Sua presença, no entanto, pode ser negligenciada quando comparados a intensidade das bandas principais provenientes do BOPP.

5.1.4 Difração de Raios-X

Os espectros de difração de raio x das aparas gráficas e do BOPP reciclado foram realizados conforme a metodologia apontada anteriormente, e a Figura 20 exhibe os espectros obtidos para ambos os resíduos:

Figura 20: Espectro DRX para resíduos utilizados.

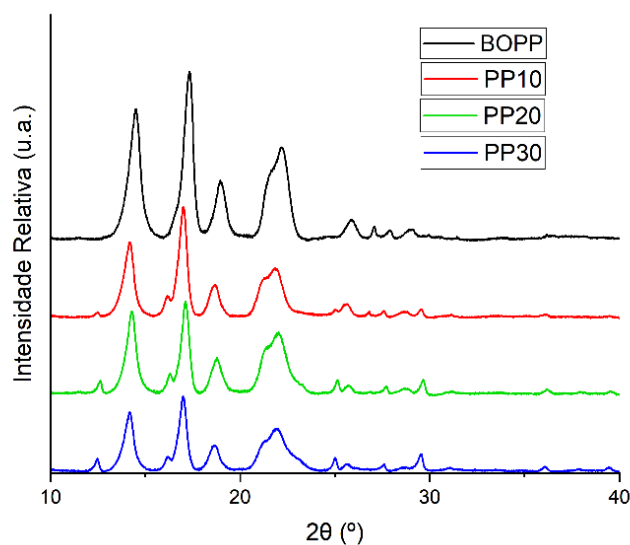


Fonte: O Autor (2025).

Os espectros de DRX de ambos os materiais apresentam picos similares em valores de 2θ de 21° típico da estrutura amorfa, ao passo que valores de 14.1° , 17° , 18.5° , 22.1° e 29° , assim como o pico em 21.2° presente no espectro do BOPP reciclado, são provenientes dos cristais em fase α do Polipropileno isostático (LANYI, 2020). O pico em 25° presente no espectro do BOPP reciclado, assim como o pico em 13° presente no espectro das aparas, são característicos da fase α do Polipropileno Sindiotático. A ausência de um pico em 21.2° no espectro das aparas pode ser explicada pelo processo de biorientação, que causa deslizamento de planos na estrutura cristalina do material durante o estiramento (TÜRKCÜ, 2004).

Os espectros dos compósitos podem ser observados na Figura 21. A análise de DRX indica que o aumento de resíduos gráficos na composição das amostras resulta em um pequeno aumento dos picos referentes a fase cristalina α do polipropileno em relação ao pico em 21° , característico de sua fase amorfa.

Figura 21: Espectro DRX para resíduos utilizados e compósitos fabricados.



Fonte: O Autor (2025).

Esse resultado sugere um aumento da cristalinidade do material, que pode ser verificada pelo método de Segal, cujos valores estão disponíveis na Tabela 3. O grau de cristalinidade de um material influencia suas propriedades mecânicas, podendo resultar em uma diferença significativa de características mecânicas entre os materiais analisados, mas como essa variação se mostra relativamente pequena, os efeitos da redução da cristalinidade nas propriedades físicas dos compósitos podem ser considerados mínimos.

Os valores de cristalinidade encontrados se mostram de acordo com o trabalho de (DIEZ e colab., 2005) que determinou o índice de cristalinidade de filmes de BOPP, encontrando valores entre 42% e 51%, corroborando a conclusão de que a adição de aparas gráficas não influencia gravemente na cristalinidade do material polimérico.

Tabela 3: Índices de Cristalinidade dos materiais compósitos pelo método de Segal.

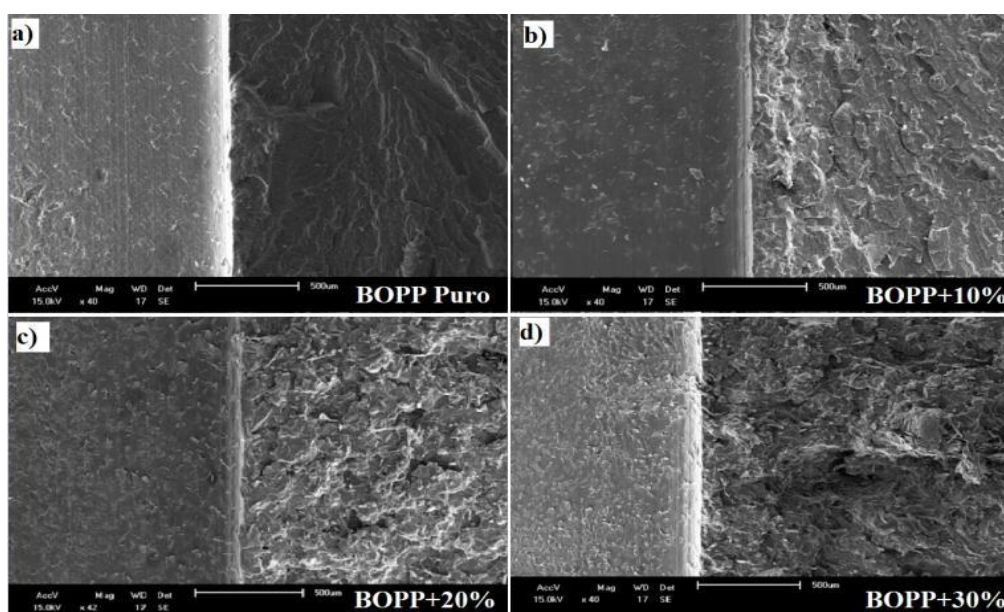
Amostra	Índice de Cristalinidade (%)
BOPP Puro	47,17%
BOPP + 10% de aparas	50,33%
BOPP + 20% de aparas	53,85%
BOPP + 30% de aparas	56,52%

Fonte: O Autor (2025).

5.1.5 Microscopia de Varredura

A Figura 22 mostra as imagens obtidas pela análise MEV realizada nas superfícies de fratura dos corpos de prova de impacto. Comparando as imagens resultantes pode-se observar uma mudança na rugosidade da superfície analisada. As amostras de BOPP reciclado puro apresentaram uma superfície mais lisa em relação aos demais compósitos. Esses, por sua vez, apresentaram superfície de fratura progressivamente mais rugosa conforme a porcentagem de fibras no material aumenta.

Figura 22: Imagens de MEV para amostras de a) BOPP, b) PP10, c) PP20 e d) PP30.



Fonte: O Autor (2025).

Percebe-se também a presença do reforço na superfície de fratura nas amostras de PP10, PP20 e PP30 indicadas na imagem como pontos brancos. A maior rugosidade em relação ao polímero puro indica que o reforço se aderiu bem a matriz, indicando que não aconteceu o efeito de “*pull out*” visível nas amostras de PP20 e PP30, na qual a matriz de BOPP aparenta ter sido “puxada” junto do reforço no impacto, um resultado similar ao encontrado no trabalho de (NARANJO e colab., 2020), que observou esse mesmo fenômeno quando analisando reforços contendo celulose em matrizes poliméricas.

Embora essa deformação pareça indicar um comportamento dúctil no material, a deformação apresentada pode ser explicada pelo mecanismo de tração que o reforço sofre no impacto, resultando no escoamento nas regiões locais da matriz que estão em contato

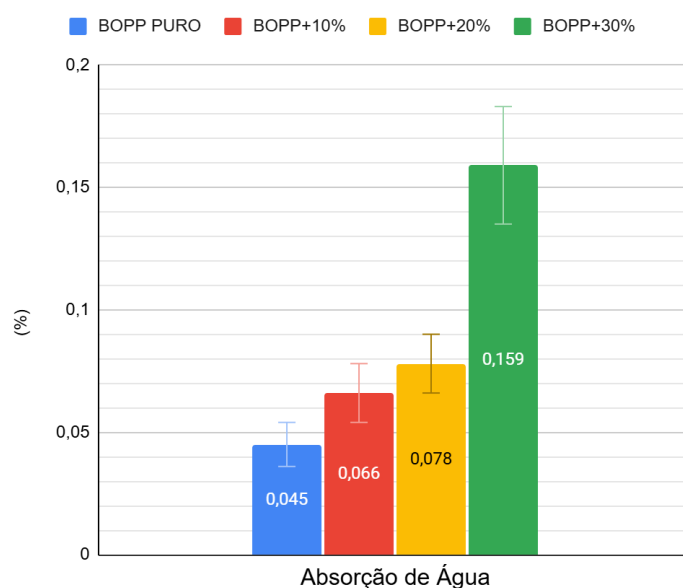
com a carga do compósito e possuem uma boa adesão ao mesmo, dissipando energia no momento de impacto. (DASSIOS, 2007)

5.1.6 Absorção de Água

O ensaio de absorção de água indicou como o aumento de aparas gráficas na composição das amostras influencia a absorção de água do material, indicado na Figura 23. A adição de material orgânico, principalmente na forma de celulose presente nos resíduos gráficos, resulta em um aumento na quantidade de H₂O absorvida pelos corpos de prova. Esse comportamento provém da presença de celulose nos resíduos gráficos, que possuem alto teor de absorção de água.

A adição de massa pode ser considerada negligente, no entanto, visto que mesmo no caso mais extremo, para o corpo de prova PP30, o aumento total de água absorvida não ultrapassa 0,2%, indicando que a presença de umidade no local de trabalho não afetara significativamente o material utilizado. Também foi realizado, seguindo a mesma norma, o ensaio nos tubetes de papelão, porém ao serem submersos em água se desmancharam em menos de 5 min, dando a concluir que possuem uma alta absorção de água com a grade problemática que não suporta alta exposição a água.

Figura 23: Gráfico de Absorção de Água para os materiais avaliados.



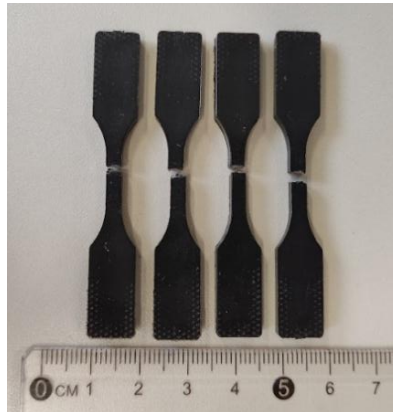
Fonte: O Autor (2025).

5.2 Caracterização Mecânica

5.2.1 Ensaio de Tração

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração e sofreram ruptura na parte indicada pela norma obedecida, como mostra a Figura 24:

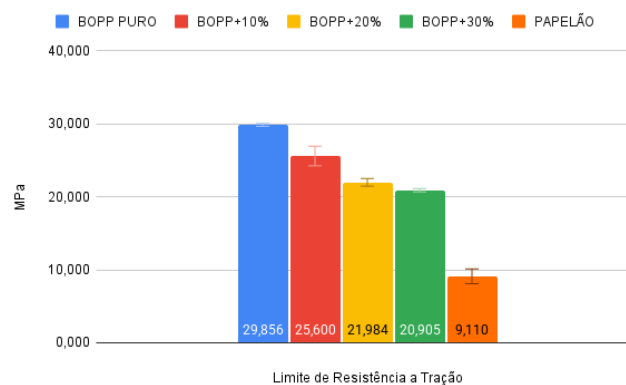
Figura 24: Corpos de prova de Tração após ensaio.



Fonte: O Autor (2025).

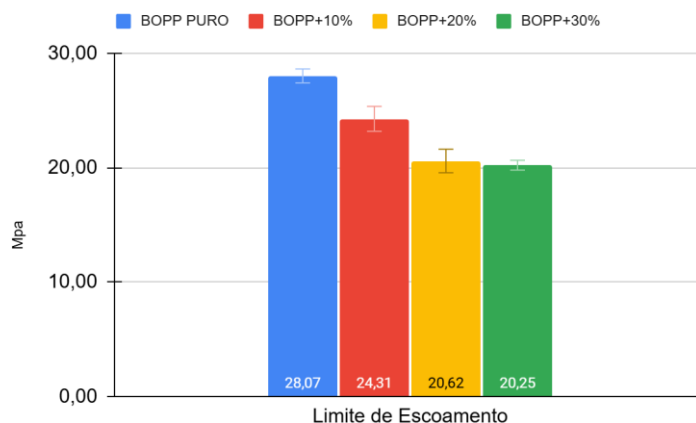
Os resultados do ensaio de tração para o limite de resistência a tração, limite de escoamento e módulo elástico podem ser visualizados nos gráficos indicados nas Figura 25, Figura 26, Figura 27. Dando um destaque no limite de escoamento apresentado na Figura 26, a ausência de valores para o papelão se deve a seu comportamento durante o ensaio de tração, em que a ruptura ocorre antes de o material sofrer deformação plástica. O ensaio de tração também foi realizado com corpos de prova de papelão comercial usado em tubetes convencionais, de forma a permitir a comparação entre os materiais.

Figura 25: Gráfico de Limite de Resistência a Tração dos materiais avaliados.



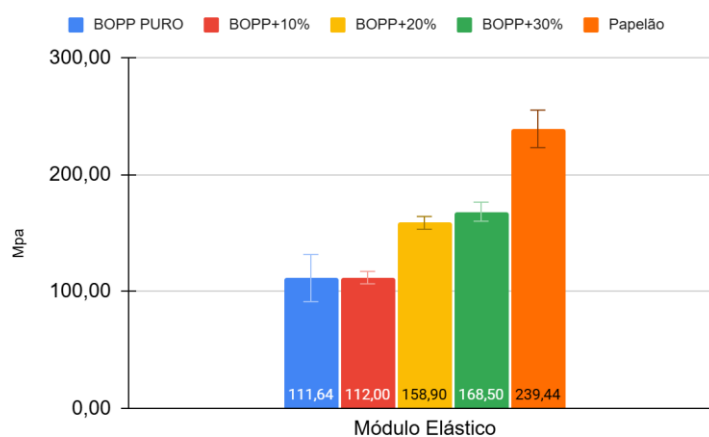
Fonte: O Autor (2025).

Figura 26: Gráfico de Limite de Escoamento para os materiais avaliados.



Fonte: O Autor (2025).

Figura 27: Gráfico de Módulo Elástico para os materiais avaliados.



Fonte: O Autor (2025).

Os valores de propriedades mecânicas para o BOPP encontrados na literatura podem ser comparados aos resultados obtidos no ensaio de tração. ROHIT (2016) determinou que o BOPP apresenta uma resistência máxima à tração (LRT) de 33,8 MPa, valor similar ao encontrado nesse estudo de 29,86 MPa. Já o módulo elástico de 111,64 MPa apresentou uma redução significativa comparado ao valor de 210 MPa, determinado por DIEZ (2005). Essa diferença pode ser justificada pelo tipo de material analisado, dado que o BOPP investigado por DIEZ (2005) provém diretamente da indústria, após sua fabricação, ao passo que esse trabalho investigou as características do BOPP reciclado, tendo sofrido ciclos de reaquecimento atribuídos ao processo de reciclagem, que resulta em queda das propriedades mecânicas de termoplásticos.

As figuras indicam que com o aumento da quantidade de reforço em sua composição, a resistência ao escoamento e resistência à ruptura das amostras sofrem uma redução, ao passo que seu módulo elástico aumenta, uma variação semelhante as mudanças identificadas nos compósitos com aparas analisados por MANTOVANI (2015). Esses resultados indicam uma mudança de comportamento no material, se tornando mais frágil à medida que aparas são adicionadas à sua composição.

Essa variação entre as características mecânicas encontradas pode ser investigada estatisticamente por meio de uma análise ANOVA seguida de um teste de Tukey, realizado com confiança de 95%. Os resultados da análise estatística são apresentados na Tabela 4:

Tabela 4: Valores de P para o teste de Tukey realizado nos resultados de Tração.

Pares amostrais	Valor de P dos pares amostrais obtido para cada teste		
	Limite de resistência a Tração	Limite de Escoamento	Módulo Elástico
PP20 - PP10	0.0000006	0.0000144	0.0000000
PP30 - PP10	0.0000000	0.0000025	0.0000000
BOPP - PP10	0.0000000	0.0002063	0.9746741
PP30 - PP20	0.0281808	0.7855717	0.1196106
BOPP - PP20	0.0000000	0.0000000	0.0000000
BOPP - PP30	0.0000000	0.0000000	0.0000000

Fonte: O Autor (2025).

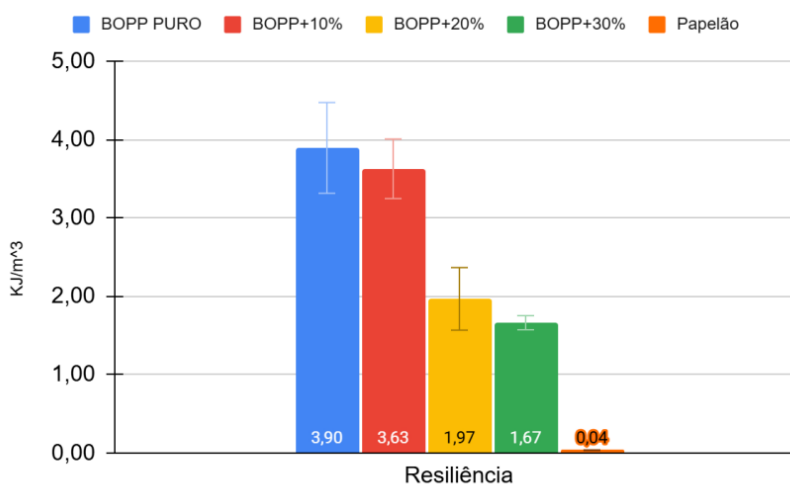
A análise estatística indica que o aumento da porcentagem em massa de aparas no compósito resulta em um aumento real na LRT do material, indicado por uma diferença significativa entre as médias obtidas ($p < 0,05$). No entanto a mesma análise aponta que para o limite de escoamento não existe uma diferença real entre as amostras com 20 e 30% em massa de aparas. Similarmente, para o Módulo Elástico, não existe uma diferença significativa entre as amostras de BOPP puro e PP10, nem entre as amostras de PP20 e PP30.

Esse resultado pode ser proveniente de erros na fabricação das amostras, como falta de homogeneização do reforço dentro da matriz. Outra hipótese seria que a adição de resíduos gráficos a matriz de BOPP não gera uma alteração linear de todas as suas propriedades mecânicas. LITAIFF (2025) obteve um comportamento similar em seu

estudo, notando a falta de comportamento linear esperado na caracterização mecânica de um compósito contendo BOPP.

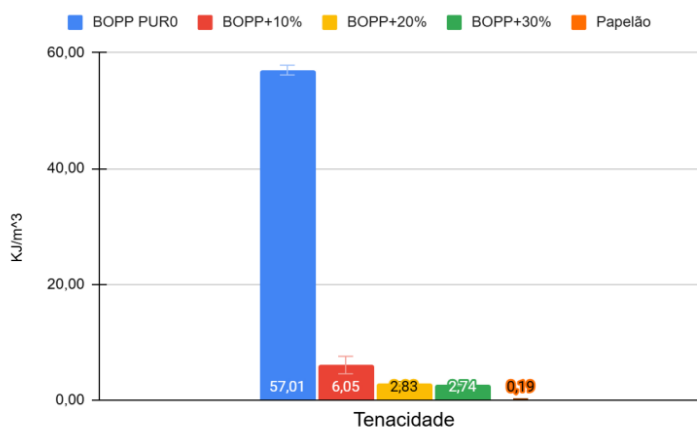
Essa mudança de comportamento observada, onde o material se torna mais frágil a medida que a fração de resíduos gráficos aumenta, é corroborada pelos resultados de resiliência e tenacidade, disponíveis nas Figuras 28 e 29:

Figura 28: Gráfico de Resiliência para os materiais avaliados.



Fonte: O Autor (2025).

Figura 29: Gráfico de Tenacidade para os materiais avaliados.



Fonte: O Autor (2025).

Os valores de resiliência e tenacidade diminuem conforme a porcentagem de resíduo gráfico aumenta no material, confirmado uma mudança de comportamento no qual o reforço fragiliza o compósito. Apesar dessas variações, e dos resultados obtidos pela análise de dados, as propriedades encontradas para os compósitos se apresentam

superiores aos do papelão comercial em todas as áreas exceto módulo elástico, indicando que esses materiais poderiam aguentar as cargas resultantes da atuação como tubetes mesmo possuindo espessuras relativamente menores.

5.2.2 Ensaio de Flexão

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de flexão e sofreram deformação plástica de forma indicada pela norma obedecida, como mostra a Figura 30:

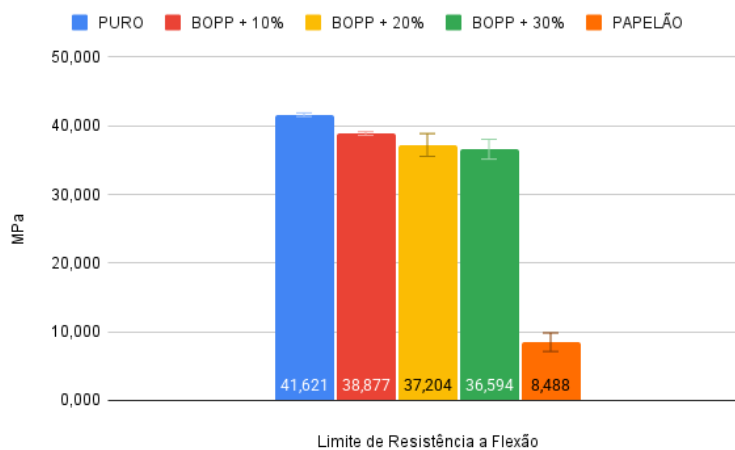
Figura 30: Corpos de prova de Flexão após ensaio.



Fonte: O Autor (2025).

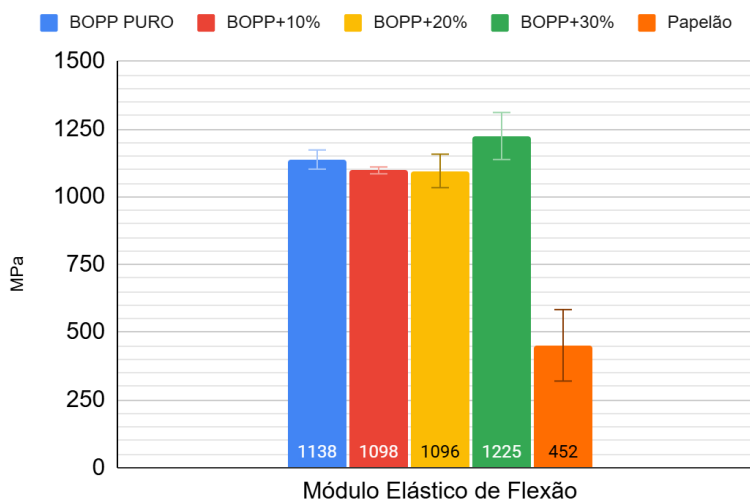
As propriedades mecânicas de flexão dos materiais foram demonstradas nas Figuras 31 e 32:

Figura 31: Gráfico de Tensão de Flexão para os materiais avaliados.



Fonte: O Autor (2025).

Figura 32: Gráfico de Módulo Elástico de Flexão para os materiais avaliados.



Fonte: O Autor (2025).

O valor de Tensão de flexão para o BOPP puro pode ser comparado com o valor obtido por DI PEDE (1990) que realizou ensaio de flexão em amostras de BOPP virgem e encontrou uma tensão máxima de flexão entre 1800 MPa e 2600 MPa, indicando que o processo de reciclagem afetou negativamente as propriedades mecânicas do material.

A análise dos dados obtidos pode ser observada na Tabela 5. O teste de Tukey indica que embora exista uma diferença real para o limite de resistência a flexão entre a amostra de BOPP puro e as amostras de compósitos, não há desigualdade significativa entre as médias para as amostras de PP10, PP20 e PP30, indicando que as aparas adicionadas interferem na sua capacidade de suportar cargas em flexão independentemente de sua quantidade.

Em contrapartida, a análise de dados para o Módulo de Young mostra que a hipótese nula não é válida para nenhuma combinação amostral, indicando que a existência de reforço na matriz de BOPP reciclado não interfere na sua rigidez de flexão.

Tabela 5: Valores de P para o teste de Tukey realizado nos resultados de Flexão.

Pares amostrais	Valor de P dos pares amostrais obtido para cada teste	
	Limite de resistência a Flexão	Módulo de Young
PP20 - PP10	0.0930666	0.8159203
PP30 - PP10	0.0015298	0.7971961
BOPP - PP10	0.0032992	0.7039022
PP30 - PP20	0.3736593	0.9998019
BOPP - PP20	0.0000151	0.9968924
BOPP - PP30	0.0000002	0.9891039

Fonte: O Autor (2025).

A mesma variação entre as médias encontrada na tensão máxima de tração pode ser observada na tensão de flexão para os materiais compósitos, onde a adição de aparas gráficas resultou em uma diminuição da carga máxima suportada pelo material. Essa diferença, no entanto, se mostra relativamente pequena quando comparada com o resultado obtido para o papelão comercial. Todos os materiais compósitos testados apresentaram uma resistência a flexão muito superior ao da matéria-prima convencional utilizado na fabricação de tubetes.

De forma similar, os módulos elásticos de flexão encontrados para os corpos de prova fabricados com aparas gráficas se mostraram semelhantes ao valor do BOPP reciclado puro, sendo todos significativamente maiores que o módulo de Young obtido para o papelão comercial. Dado a natureza da operação de tubetes como suporte e eixo falso para filmes de impressão, as características mecânicas obtidas nesse ensaio indicam que a blenda de BOPP reciclado com aparas gráficas é adequada para operar como tubetes, podendo possuir espessuras menores que os padrões comerciais de papelão ao passo de serem capazes de suportarem as mesmas cargas aplicadas.

5.2.3 Ensaio de Impacto Izod

A Figura 33 mostra os corpos de prova de impacto após ensaio mecânico, mostrando a fratura ocasionada pelo ensaio em linha com o entalhe produzido.

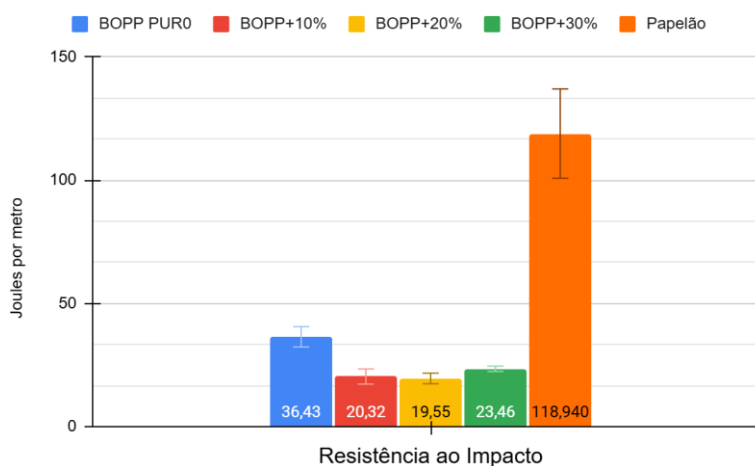
Figura 33: Corpos de prova de Impacto após ensaio.



Fonte: O Autor (2025).

Os resultados do ensaio de impacto mostraram uma grande diferença entre os compósitos fabricados e o papelão comercial, como mostra a Figura 34:

Figura 34: Gráfico de Resistência ao Impacto para os materiais avaliados



Fonte: O Autor (2025).

LÍBANO (2012) determinou que o BOPP em compósitos apresenta um comportamento não linear em seus efeitos na resistência ao impacto do material, similarmente ao comportamento observado nos resultados obtidos. A discrepância entre o valor obtido para o BOPP reciclado de 36,43 J/m, com a resistência ao impacto determinada por MANTOVANI (2015) de 41,0 J/m, pode ser explicada devido ao número de processos que o material sofreu em sua reciclagem, modificando suas propriedades mecânicas.

A adição de aparas gráficas a matriz polimérica de BOPP reciclado resulta em uma queda na capacidade do material de absorver energia e resistir ao impacto quando comparado a matriz pura. No entanto, os resultados obtidos indicam que a quantidade de reforço adicionado não influencia significativamente no comportamento do material, visto que a resistência ao impacto entre as amostras PP10, PP20 e PP30 apresentaram resistência ao impacto semelhante em relação a amostra de BOPP puro.

Esses resultados podem ser comprovados com uma análise numérica pelo método de Tukey, indicado na Tabela 6. Os valores obtidos para P sugerem uma variação real na capacidade de absorção de energia no impacto entre a amostra de BOPP puro e as amostras de compósitos, ao passo que rejeita a hipótese nula na comparação entre os materiais contendo aparas, apontando que a adição de reforço nos corpos de prova não resulta em uma diferença significativa na sua resistência ao impacto.

Tabela 6: Valores de P para o teste de Tukey realizado nos resultados de Impacto.

Pares amostrais	Valor de P dos pares amostrais de Impacto
PP20 - PP10	0.7982016
PP30 - PP10	0.7441291
BOPP - PP10	0.0000002
PP30 - PP20	0.1842465
BOPP - PP20	0.0000000
BOPP - PP30	0.0000004

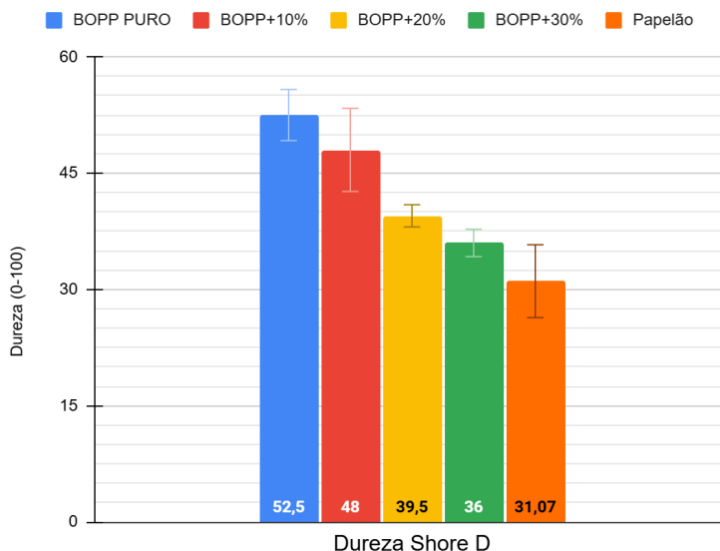
Fonte: O Autor (2025)

Os materiais poliméricos apresentaram propriedades pequenas em comparação ao papelão comercial. No entanto, dado que a operação de tubetes não inclui impactos frequentes, a queda dessa propriedade mecânica não desqualifica o material compósito como possível alternativa de matéria-prima.

5.2.4 Ensaio de Dureza

Os resultados obtidos para o teste de dureza Shore-D foram disponibilizados na Figura 35, mostrando uma redução linear na dureza do material à medida que a quantidade de reforço aumenta.

Figura 35: Gráfico de Dureza para os materiais avaliados.



Fonte: O Autor (2025).

A análise indica, com 95% de confiança, que existe uma diferença real entre as médias de Dureza entre as amostras BOPP, PP10 e PP20, mas que a partir de 20% de aparas em massa, não há uma variação significativa nessa propriedade mecânica, como pode ser observado no p-valor entre PP20 e PP30 na Tabela 7. Embora Esse resultado possa indicar que a dureza do material compósito estabiliza a partir de certa porcentagem de resíduo, os valores obtidos ainda são maiores que a dureza observada para o papelão de uso comercial.

Tabela 7: Valores de P para o teste de Tukey realizado nos resultados de Dureza.

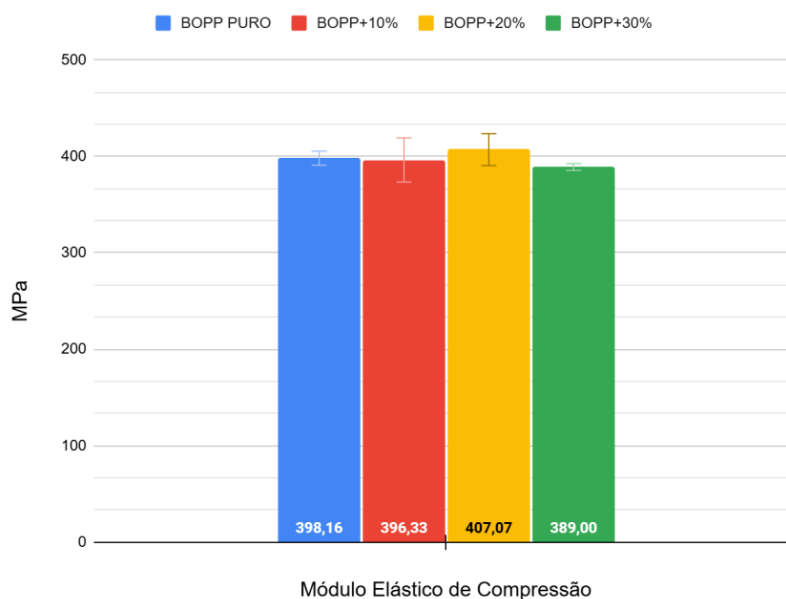
Pares amostrais	Valor de P dos pares amostrais de Dureza
PP20 - PP10	0.0104292
PP30 - PP10	0.0002546
BOPP - PP10	0.0340823
PP30 - PP20	0.4501844
BOPP - PP20	0.0000128
BOPP - PP30	0.0000004

Fonte: O Autor (2025).

5.2.5 Ensaio de Compressão

Após o ensaio de compressão, o módulo de resistência a compressão dos corpos de prova avaliados foi calculado conforme a norma, e os resultados mostraram pouca variação entre si, como indica a Figura 36.

Figura 36: Gráfico de Resistência a Compressão para os materiais avaliados



Fonte: O Autor (2025)

Essa falta de mudança nas propriedades de compressão do material pode ser confirmada com uma análise pelo método de Tukey, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8: Valores de P para o teste de Tukey realizado nos resultados de Compressão

Pares amostrais	Valor de P dos pares amostrais de Compressão
PP20 - PP10	0.6445602
PP30 - PP10	0.9147317
BOPP - PP10	0.9999986
PP30 - PP20	0.4617901
BOPP - PP20	0.6345114
BOPP - PP30	0.9079239

Fonte: O Autor (2025)

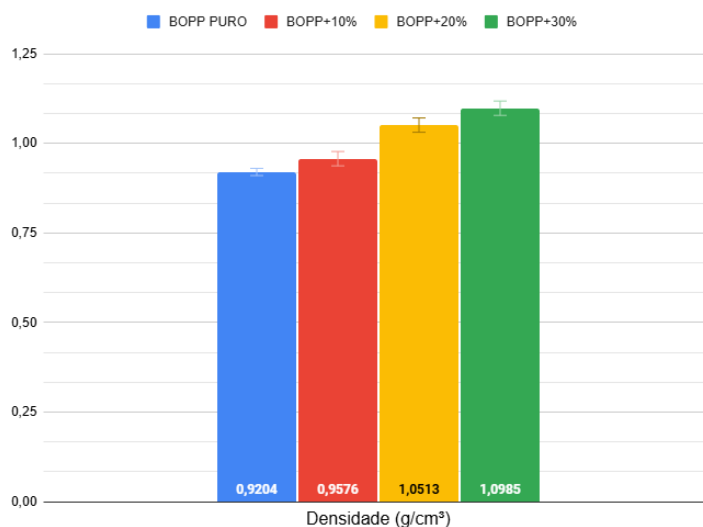
O teste de Tukey indica que a hipótese nula não é válida para qualquer combinação amostral. As médias analisadas não possuem diferença significativa entre si independentemente da quantidade de aparas gráficas adicionadas ao material. A principal hipótese para explicar esse resultado é a de que o reforço em questão não modifica a capacidade da matriz, o BOPP reciclado, de absorver energia e se deformar sob forças de compressão.

5.2.6 Análise de Densidade

A picnometria foi utilizada para determinar a mudança de densidade acarretada pelo aumento da fração de aparas em massa nos compósitos, indicada na Figura 37, onde a adição de resíduos gráficos aparenta resultar no aumento da densidade dos compósitos. Uma maior densidade iria acarretar em maiores esforços no material decorridos por seu próprio peso, porém a variação observada é relativamente pequena em relação a seu valor absoluto, e os efeitos do aumento de peso do material podem ser considerados negligenciáveis comparados com as cargas suportadas por tubetes comerciais em operação.

O valor de densidade encontrado pode ser comparado com os resultados obtidos por (ROHIT; DIXIT, 2016) que indicou uma densidade para o BOPP puro de $0,88 \text{ g/cm}^3$. Esse valor se mostra muito similar ao resultado encontrado de $0,9204 \text{ g/cm}^3$, podendo-se atribuir a diferença para erros experimentais.

Figura 37: Gráfico de Densidade para os materiais avaliados.



Fonte: O Autor (2025)

Os resultados obtidos foram analisados pelo teste de Tukey e os resultados foram alocados na Tabela 9. O teste estatístico indicou a ausência de equivalência entre as médias de forma que a densidade do material varia com a carga de aparas adicionada em sua composição.

Tabela 9: Valores de P para o teste de Tukey realizado nos resultados de Densidade.

Pares amostrais	Valor de P dos pares amostrais de Compressão
PP20 - PP10	0.0035824
PP30 - PP10	0.0000000
BOPP - PP10	0.0000000
PP30 - PP20	0.0000000
BOPP - PP20	0.0000000
BOPP - PP30	0.0004381

Fonte: O Autor (2025)

5.3 Determinação do diâmetro dos tubetes

Com os resultados encontrados, foi analisado se os tubetes feitos por meio dos compósitos seriam capazes de suportar a carga que o de papelão suporta. Foi considerado nessa aplicação que a força aplicada causaria apenas tensão de cisalhamento no material, logo $\sigma_x = \sigma_y = 0$. Dessa forma a Equação (2) fica:

$$\sigma_1, \sigma_2 = \pm \sqrt{\tau_{xy}^2} \quad (6)$$

Para calcular a tensão de cisalhamento, calculou-se o segundo momento polar de área pela Equação (4), onde o $D_e = 0,083 \text{ m}$ e $D_i = 0,079 \text{ m}$, como mostrado na Figura 12.

$$J = \frac{\pi}{32} * (D_e^4 - d_i^4) \quad (7)$$

$$J = \frac{\pi}{32} * (0,083^4 - 0,079^4) = \frac{\pi}{32} * 8,5 * 10^{-6}$$

$$J = 8,35 * 10^{-7} \text{ m}^4$$

Dessa forma, é possível calcular a tensão de cisalhamento utilizando a Equação (3), sabendo que $T = F * d$. A distância utilizada é de $d = 0,05 \text{ m}$, pois a força está sendo aplicada no meio do tubete e o $r = 0,0415 \text{ m}$. Sendo assim:

$$\tau_{xy} = \frac{T * r}{J} = \frac{F * d * r}{J} \quad (8)$$

$$\tau_{xy} = \frac{F * 0,05 * 0,0415}{8,35 * 10^{-7} \text{ m}^4}$$

$$\tau_{xy} = 2484,154 * F \text{ MPa} \quad (9)$$

Aplicando agora a Equação (9) na Equação (6) encontramos as tensões principais:

$$\sigma_1, \sigma_2 = \pm \sqrt{\tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_1, \sigma_2 = \pm \sqrt{(2484,154 * F)^2}$$

$$\sigma_1 = 2484,154 * F \text{ MPa} \text{ e } \sigma_2 = -2484,154 * F \text{ MPa} \quad (10)$$

Com esse resultado, juntou-se as Equações (5) e (10) para encontrar a força geradora do cisalhamento no material. Como está sendo analisado a falha, foi considerado $n = 1$ (BUDYNAS; NISBETT, 2016). Além disso, os valores de limite de escoamento e limite de resistência a tração do papelão, foram retirados das Figura 26 e Figura 25 sendo respectivamente, $\sigma_{Sut} = 9,1 \text{ MPa}$ e $\sigma_{Suc} = 9,1 \text{ MPa}$. Dessa forma:

$$\frac{\sigma_A}{S_{ut}} - \frac{\sigma_B}{S_{uc}} = \frac{1}{n} = 1$$

$$\frac{2484,154 * F}{S_{ut}} - \left(-\frac{2484,154 * F}{S_{uc}} \right) = 1$$

$$F = 1831,61 \text{ N}$$

Portanto, a força necessária para o cisalhamento do tubete de papelão é $F = 1831,61 \text{ N}$, com um $D_e = 0,083 \text{ m}$. Conhecendo a força máxima que o tubete de papelão suporta, foram refeitas as contas para descobrir o diâmetro externo que o tubete de compósito precisa ter para suportar a mesma carga. Assim, foi utilizado a Equação (8) para encontrar a nova tensão de cisalhamento em função do diâmetro externo. Para essa

análise, o diâmetro interno permaneceu fixo em 79 mm, pois é o tamanho para encaixe no maquinário. Sendo assim:

$$\tau_{xy} = \frac{T * r}{J} = \frac{F * d * r}{J} = \frac{F * d * \left(\frac{D_e}{2}\right)}{\frac{\pi}{32} * (D_e^4 - d_i^4)} \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = \frac{1831,61 * 0,05 * \left(\frac{D_e}{2}\right)}{\frac{\pi}{32} * (D_e^4 - 0,079^4)} = \frac{91,5805 * \left(\frac{D_e}{2}\right)}{\frac{\pi}{32} * (D_e^4 - 0,079^4)}$$

$$\tau_{xy} = 466,42 * \frac{\left(\frac{D_e}{2}\right)}{(D_e^4 - 0,079^4)} \quad (12)$$

Agora, substituindo na Equação (6) temos $\sigma_1 = 466,42 * \frac{\left(\frac{D_e}{2}\right)}{(D_e^4 - 0,079^4)}$ e $\sigma_2 = -466,42 * \frac{\left(\frac{D_e}{2}\right)}{(D_e^4 - 0,079^4)}$. Com os valores de tensão substituímos eles na Equação (5) com cada valor de S_{ut} e S_{uc} do BOPP, P10, P20 e P30, que foram separados na Tabela 10.

Tabela 10: Valores de limite de escoamento e limite de resistência a tração dos compósitos

Amostras	S_{ut} (MPa)	S_{uc} (MPa)
BOPP	26,07 ± 0,61	29,86 ± 0,12
PP10	22,31 ± 1,09	25,600 ± 1,35
PP20	19,62 ± 1,30	21,99 ± 0,52
PP30	19,25 ± 0,43	20,90 ± 0,23

Fonte: O Autor (2025)

Ao final dos cálculos chegamos nos valores de diâmetro externo para cada compósito estudado, apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Diâmetro externo dos tubetes feitos dos compósitos.

Amostras	D_e (mm)
BOPP	80,3
PP10	80,5
PP20	80,8
PP30	80,8

Fonte: O Autor (2025)

Portanto, um tubete feito a partir dos compósitos, independentemente da quantidade de reforço aplicado, seria capaz de suportar a força que causaria o cisalhamento no de papelão, com um diâmetro externo menor.

6 CONCLUSÃO

O processo de reciclagem das aparas das indústrias gráficas se mostrou eficaz e com uma aplicação proposta coerente com os resultados encontrados. A caracterização físico-química do compósito mostrou uma ótima homogeneização entre a matriz de BOPP reciclado e as aparas, o que garante um processo de fabricação eficiente do tubete, com um material que apresenta boa adição de cargas do resíduo, garantindo uma resistência importante para o uso comercial.

Dessa forma, analisando os ensaios mecânicos feitos, quando comparados os resultados dos compósitos, percebe-se que há uma relativa pequena diferença entre suas propriedades mecânicas. Se destaca com maiores mudanças, a tenacidade e resiliência do material, que não interferem na aplicação desejada, mas, mesmo tendo diminuído com o aumento do reforço, apresenta valor maior que o papelão. Os resultados que trazem importâncias significativas para a aplicação estudada são obtidos pelos ensaios de flexão e compressão. A análise do módulo elástico de flexão mostrou um aumento de 1137,69 MPa para o BOPP puro à 1225,83 MPa para o com a adição de 30% de aparas, sendo muito inferior ao do papelão de 452 MPa. A tensão de flexão apresentou característica semelhante, obtendo um valor maior do que a do papelão. O módulo de compressão demonstrou valores muito próximos entre si, com o aumento das cargas de aparas.

Com isso, com os resultados obtidos, foi estimado que um tubete comercial de 83mm de diâmetro externo, suporta uma força de flexão de até 1831,61 N antes de cisalhar. Esse resultado foi utilizado para mostrar que os tubetes feitos a partir dos compósitos seriam capazes de suportar a mesma carga, o que foi validado pelo método de Coulomb Mohr para materiais frágeis, que determinou que para a mesma força aplicada, os tubetes precisariam de um diâmetro externo menor do que o comercial, ficando entre 80,3 mm à 80,8 mm dependendo da quantidade de cargas adicionadas.

Portanto, conclui-se que o processo de reciclagem dos resíduos da indústria gráfica se torna eficiente, sendo uma solução sustentável para eles, não mais descartando-o, mas utilizando para um produto que substitui de forma eficiente o comercial utilizado. Esse resultado mostra que seria possível até mesmo diminuir a quantidade de material utilizado para a fabricação dos tubetes, para a mesma aplicação.

7 REFERÊNCIAS

ABREMA. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024*. . São Paulo: [s.n.], 2024.

ANYADIKE, Nnamdi. *Embalagens flexíveis*. São Paulo: Editora Blucher, 2010.

ASSAIFAN, Abdulaziz K. e colab. *Scaling-up medical technologies using flexographic printing*. *Talanta*, v. 219, p. 121236, 1 Nov 2020. Disponível em: <[https://www.sciencedirect-com.ez79.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0039914020305270?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com.ez79.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0039914020305270?via%3Dihub)>. Acesso em: 20 mai 2025.

AUGUSTO MANTOVANI, Guilherme. *Reciclagem Mecânica de Resíduos de Rótulos e Etiquetas Utilizando Cinzas do Bagaço de Cana-de-Açúcar (Mestrado)*. . Maringá: [s.n.], 2015.

BARBOSA CARVALHO, Lídia. *Produção de polipropileno bi-orientado (bopp): tecnologia eaplicações (mestrado)*. . Bragança: [s.n.], 2007.

BRODA, J. e colab. *Nucleating agents based on graphene and graphene oxide for crystallization of the β -form of isotactic polypropylene*. *J Mater Sci* 55, p. 1436–1450, 2020.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J.Keith. *Elementos de Máquinas de Shigley* . 10. ed. São Paulo: AMGH Editora Ltda, 2016.

DASSIOS, Konstantinos G. *A review of the pull-out mechanism in the fracture of brittle-matrix fibre-reinforced composites*. *Advanced Composites Letters*. [S.l: s.n.], 2007.

DE SOUZA, Christiane Sales Reis e colab. *Estudo do comportamento térmico de laminados carbono/epóxi submetidos a múltiplos ciclos térmicos*. Polimeros: Ciência e Tecnologia, v. 21, n. São Carlos, p. 312–317, 2011.

DI PEDE, Sandro; WOODHAMS, Raymond T. *Deep drawing self-reinforced thermoplastic sheet*. Polymer Engineering and Science, v. 30, n. 79, 1990.

DIEZ, F. J. e colab. *Influence of the stretching in the crystallinity of biaxially oriented polypropylene (bopp) films*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 81, p. 21–25, 2005.

DING, Liping; ZHANG, Xiaoyong; WANG, Yanqing. *Study on the behavior of bopp film treated by corona discharge*. Coatings, v. 10, n. 12, p. 1–11, 1 Dez 2020.

GARCIA, Dorival Pinheiro; CARASCHI, José Cláudio; VENTORIM, Gustavo. *Decomposição térmica de pellets de madeira por tga*. HOLOS, v. 1, n. 32, p. 141–149, 15 Fev 2016.

ÍNDICE DE RECICLAGEM MECÂNICA DE PLÁSTICO NO BRASIL ATINGE 25,6% EM 2022, REVELA ESTUDO DO PICPLAST.

JUNIOR, Callister; RETHWISH, David G. *Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

LANYI, Franz J. *Modification of Interfacial Properties of Polypropylene Fibers using Hydrophilic Melt Additives - Interactions with Crystallization*. 34. ed. Erlangen: FAU Forschungen, Reihe B: Medizin, Naturwissenschaft, Technik, 2020.

LÍBANO, Elaine V.D.G.; VISCONTE, Leila L.Y.; PACHECO, Élen B.A.V. *Propriedades Térmicas de Compósitos de Polipropileno e Bentonita Organofílica*. Polimeros, v. 22, n. 5, p. 430–435, 2012.

MANTOVANI, Guilherme Augusto e colab. *Mechanical recycling of tags and labels residues using sugarcane bagasse ash*. Polimeros, v. 27, n. 1, p. 8–15, 1 Jan 2017.

MEDEIROS, Otoniel Marcelino. *Alternativas de Ultimação de Resíduo Plástico Termofixo (Tese de Doutorado)*. . Natal: [s.n.], 2005.

NARANJO, A; LÓPEZ, J. P.; VELASCO, J. I. *Natural fibre modification and its influence on fibre-matrix interfacial properties in biocomposite materials*. Fibers and Polymers, v. 21, n. 4, p. 790–801, 2020.

PEREIRA PIRES, Jéssica; ALEGRE, Porto. *Estudo da degradação de blendas de polipropileno com aditivos comerciais*. . Porto Alegre: [s.n.], 2019.

RANJBAR, Navid e colab. *A comprehensive study of the polypropylene fiber reinforced fly ash based geopolymer*. PLoS ONE, v. 11, n. 1, 1 Jan 2016.

ROHIT, Kiran; DIXIT, Savita. *Mechanical properties of waste Biaxially Oriented Polypropylene metallized films (BOPP), LLDPE: LDPE films with sisal fibres*. American Journal of Engineering and Applied Sciences, v. 9, n. 4, p. 913–920, 2016.

SCARPETA, Eudes. *Flexografia manual prático*. . São Paulo: [s.n.], Mar 2007.

SOARES, João Vitor Souza e colab. *Determinação de parâmetros de qualidade de embalagens metalizadas flexíveis para alimentos*. Brazilian Journal of Development, v. 9, n. 3, p. 9124–9138, 2 Mar 2023.

TOLENTINO RODRIGUES, MARINELE. *ESTUDO DE PROPRIEDADES DE PROPILENO PURO E RECICLADO*. . Volta Redonda, RJ: [s.n.], 2020.

TÜRKÇÜ, Harun Nezi. *Investigation of the crystallinity and orientation of polypropylene with respect to temperature changes using ft-ir, xrd, and raman techniques*. . Ankara, Turquia: [s.n.], 2004.

WITTMANN, Milton Luiz e colab. *Estratégias e práticas socioambientais em processos flexográficos*. Revista Eletrônica de Estratégia & Negócios, v. 10, n. 2, p. 181, 19 Dez 2017.

ZANIN, Maria; MANCINI, Sandro Donnini. *Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia*. [S.l.]: EdUFSCar, 2009a.

ZANIN, Maria; MANCINI, Sandro Donnini. *Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia*. [S.l.]: EdUFSCar, 2009b.