

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO RIO GRANDE DO SUL

GERSON FRIGHETTO

**DESENVOLVIMENTO DE MADEIRA PLÁSTICA A PARTIR DA SERRAGEM DE
Pinus elliottii E RESÍDUOS DA RECICLAGEM DE POLIPROPILENO**

FARROUPILHA

2024

GERSON FRIGHETTO

**DESENVOLVIMENTO DE MADEIRA PLÁSTICA A PARTIR DA SERRAGEM DE
Pinus elliottii E RESÍDUOS DA RECICLAGEM DE POLIPROPILENO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Rio Grande do Sul, para obtenção do grau de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Linha de Pesquisa: Desenvolvimento de Materiais de Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Edson Luiz Francisquetti

FARROUPILHA

2024

CIP - Catalogação na Publicação

F912d Frighetto, Gerson
Desenvolvimento de madeira plástica a partir da serragem de pinus
elliottii e resíduos da reciclagem de polipropileno. / Gerson Frighetto
-- 2024.
60 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) -- (Mestrado profissional em Tecnologia e
Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência
e tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Farroupilha, 2024.
Orientador: Edson Luiz Francisquetti.

1. Resistência de materiais. 2. Madeira plástica. 3. Resíduos
poliméricos. I. Francisquetti, Edson Luiz, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 620.1

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária
Rejane Cristina Job CRB 10/1639

GERSON FRIGHETTO

**DESENVOLVIMENTO DE MADEIRA PLÁSTICA A PARTIR DA SERRAGEM DE
Pinus elliottii E RESÍDUOS DA RECICLAGEM DE POLIPROPILENO**

Trabalho Final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Rio Grande do Sul, como pré-requisito parcial para obtenção do grau de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Edson Luiz Francisquetti – IFR campus Farroupilha

Prof.^a Dra. Daiane Romanzini - IFR campus Feliz

Prof.^a Dra. Ana Maria Coulon Grisa – Universidade de Caxias do Sul

Prof.^a Dra. Mara Zeni Andrade

Apresentado e aprovado em: 30 de outubro de 2024
Local da defesa: Farroupilha

RESUMO

A utilização de resíduos pós consumo e industriais é uma possibilidade que vem sendo avaliada, como forma de minimizar os impactos causados em função da grande quantidade de resíduos gerados na atualidade. Resíduos poliméricos pós consumo e resíduos do beneficiamento de madeira são dois resíduos que geram preocupação ambiental devido às dificuldades no descarte, gerando um passivo ambiental. A utilização desses resíduos na produção de madeira plástica torna-se uma alternativa, contribuindo com o conceito de economia circular. Este trabalho tem por objetivo produzir um compósito de madeira plástica (WPC) a partir de um resíduo polimérico e serragem nas concentrações de 10, 20 e 30 % em massa de serragem. As amostras foram avaliadas quanto às suas propriedades mecânicas e microestrutura, através de análises de tração, impacto, fluidez e Microscopia Eletrônica de Varredura. Os resíduos poliméricos foram caracterizados por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier e reflexão atenuada, onde foi possível identificar a mistura de polietileno e polipropileno nos resíduos. Os resultados mecânicos mostraram que a utilização de resíduos poliméricos para obtenção de um WPC, sofrem variação na resistência a tração e impacto com a adição da madeira que variou de 14 a 25 Mpa, também foi possível perceber que a adição de um agente compatibilizante provoca melhoras significativas na resistência ao impacto. Já que a adição do agente compatibilizante, ajudou a manter as propriedades do compósito uniforme, a adição de um agente modificador de impacto melhorou na resiliência do material, neste trabalho o agente modificador de impacto também influenciou positivamente na compatibilidade da matriz com o reforço.

Palavras-chave: Madeira plástica; resíduos poliméricos; agentes compatibilizantes; serragem.

ABSTRACT

The use of post-consumer and industrial waste is a possibility that has been evaluated as a way to minimize the impacts caused by the large amount of waste generated today. Post-consumer polymeric waste and wood processing waste are two wastes that generate environmental concerns due to the difficulties in disposal, generating an environmental liability. The use of these wastes in the production of plastic wood becomes an alternative, contributing to the concept of circular economy. This work aims to produce a wood-plastic composite (WPC) from a polymeric waste and sawdust in concentrations of 10, 20 and 30% by mass of sawdust. The samples were evaluated for their mechanical properties and microstructure, through tensile, impact, fluidity and Scanning Electron Microscopy analyses. The polymeric wastes were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy and attenuated reflection, where it was possible to identify the mixture of polyethylene and polypropylene in the waste. The mechanical results showed that the use of polymeric waste to obtain a WPC, suffers variation in tensile and impact resistance with the addition of wood that varied from 14 to 25 MPa, it was also possible to notice that the addition of a compatibilizing agent causes significant improvements in impact resistance. Since the addition of the compatibilizing agent helped to maintain the properties of the uniform composite, the addition of an impact modifying agent improved the resilience of the material, in this work the impact modifying agent also positively influenced the compatibility of the matrix with the reinforcement.

Keywords: Plastic wood; polymeric waste, compatibilizing agents, sawdust.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do processo de reciclagem mecânica de plásticos.....	15
Figura 2 - Processo de separação por diferença de densidade.....	16
Figura 3 - Produtos de madeira plástica	19
Figura 4 - Esquema de classificação para vários tipos de compósitos.....	20
Figura 5 - Comparativo entre madeira plástica e natural.....	22
Figura 6 - Representação do processo de extrusão.....	23
Figura 7 - Representação do processo de compressão.	24
Figura 8 - Fluxograma da produção da madeira plástica.....	26
Figura 9 – PP Virgem (a), Plásticos reciclados (b), serragem (c).	28
Figura 10 – Equipamentos para preparação do compósito.....	29
Figura 11 – Granulometria da serragem.	32
Figura 12 – Granulometria do plástico reciclado.	33
Figura 13. Imagem da distribuição granulométrica da serragem	33
Figura 14 – Imagem da distribuição granulométrica do plástico reciclado.....	34
Figura 15 - MEV dos compostos, P1 10% de madeira, com aumento de 400 X.	35
Figura 16 - MEV dos compostos, P2 20% de madeira, com aumento de 400 X.	36
Figura 17 - MEV dos compostos, P3 30% de madeira, com aumento de 400 X	36
Figura 18 - MEV dos compostos, R1 10% de madeira, com aumento de 400 X.....	37
Figura 19 - MEV dos compostos, R2 20% de madeira, com aumento de 400 X.....	37
Figura 20 - MEV dos compostos, R2 20% de madeira, com aumento de 400 X.....	38
Figura 21 - MEV dos compósitos, RV1 10% de madeira, com aumento de 400x.....	39
Figura 22 - MEV dos compósitos, RV2 20% de madeira, com aumento de 400x.....	39
Figura 23 - MEV dos compósitos, RV3 30% de madeira, com aumento de 400x.....	40
Figura 24 – Análise termogravimétrica da serragem.....	41
Figura 25 - Análise DSC Serragem.	42
Figura 26 - Análise termogravimétrica plástico reciclado.....	43
Figura 27 - Análise DSC plástico reciclado.	44
Figura 28 - Análise espectrométrica dos diferentes tipos de plásticos dos resíduos.	45
Figura 29 - Análise espectrométrica dos diferentes tipos de plásticos dos resíduos.	45
Figura 30 - Resistência ao impacto das amostras.	48
Figura 31 - Análise do índice de fluidez dos compósitos.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais utilizados.	28
Tabela 2 - Composição das amostras produzidas.	30
Tabela 3 - Resultados da tração deformação para s diferentes amostras.....	47
Tabela 4 - Resistência ao Impacto das amostras analisadas.	48
Tabela 5 - Resultados do índice de fluidez das amostras.	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Principais polímeros encontrados nos resíduos plásticos.....	14
Quadro 2 - Tipos de resíduos de madeira e possíveis aplicações.....	18
Quadro 3 - Principais aditivos e funções.	25

SUMÁRIO

ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	8
LISTA DE QUADROS.....	9
1 INTRODUÇÃO	10
1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA	11
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	12
1.2.1 Objetivo geral	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 GESTÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS URBANOS	13
2.2 PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS DE MADEIRA	17
2.3 COMPÓSITOS DE MADEIRA PLÁSTICA	19
2.4 PRODUÇÃO DE MADEIRA PLÁSTICA	22
3 MATERIAIS E METODOLOGIA.....	28
3.1 MATERIAIS	28
3.2 METODOLOGIA	29
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	32
4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	32
4.2 ANÁLISE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	35
4.3 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA.....	40
4.4 ANÁLISE ESPECTROMÉTRICA	44
4.5 ANÁLISE TENSÃO X DEFORMAÇÃO.....	46
4.6 ANÁLISE RESISTÊNCIA AO IMPACTO	47
4.7 ANÁLISE ÍNDICE DE FLUIDEZ	49
5 CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções sustentáveis na indústria, aliada ao aumento no volume de resíduos gerados pelos processos produtivos e pelo consumo, impõe a necessidade de explorar alternativas que combinem eficiência material e responsabilidade ambiental. Nesse contexto, a reutilização de resíduos plásticos e de madeira para a produção de compósitos de madeira plástica (WPCs) surge como uma estratégia promissora para a mitigação dos impactos ambientais, ao mesmo tempo em que se atende às necessidades de mercado por materiais de alta durabilidade e resistência. Conforme destaca Poletto (2017), a substituição de recursos limitados por alternativas sustentáveis tem impulsionado a pesquisa no desenvolvimento de novos materiais, aproveitando resíduos e fontes renováveis.

Os compósitos de madeira plástica consistem em uma combinação de polímeros termoplásticos e fibras naturais, como serragem de madeira, que resulta em materiais com características mecânicas aprimoradas e mais resistência ao desgaste e à degradação. Esses materiais têm se destacado por sua resistência à umidade, durabilidade e flexibilidade de aplicação, sendo amplamente utilizados em setores como construção civil, mobiliário urbano e indústrias automotivas (KIELING et al., 2019). Além disso, o uso de materiais reciclados na fabricação desses compósitos reduz a dependência de recursos virgens e contribui para a economia circular, como aponta Vantsi (2015), ao promover o reaproveitamento de resíduos que, de outra forma, seriam descartados.

Entre os principais desafios na produção de WPCs está a compatibilidade interfacial entre os polímeros reciclados e as fibras de madeira, uma vez que a adesão inadequada entre esses materiais pode comprometer as propriedades mecânicas do compósito. Para mitigar esse problema, diversos estudos, têm investigado o uso de compatibilizantes, como o anidrido maleico, que atuam melhorando a interação entre a fase plástica e a fase lignocelulósica. Mattos e Francisquetti (2018), ressaltam que a utilização desses agentes compatibilizantes, associada a técnicas de modificação de superfície, tem se mostrado eficaz na melhora da coesão da matriz, o que reflete diretamente no aumento da resistência à tração e à flexão dos materiais.

Além dos compatibilizantes, a granulometria dos componentes exerce um papel crucial na qualidade do compósito final. A seleção adequada do tamanho das partículas de serragem e de polímeros reciclados afeta tanto o processamento quanto o desempenho mecânico do produto final. De acordo com Ewrun et al (2020), uma granulometria mais fina da serragem

tende a aumentar a área de superfície de contato, facilitando a interação com a matriz plástica e, conseqüentemente, melhorando a homogeneidade do material. Por outro lado, o uso de partículas de maiores dimensões pode comprometer a uniformidade da mistura, gerando pontos de tensão que resultam em falhas mecânicas.

A tecnologia de processamento também é um fator determinante na qualidade do compósito. Processos como extrusão e moldagem por compressão têm sido amplamente utilizados na fabricação de WPCs, uma vez que permitem o controle preciso da forma e das dimensões do produto final, além de possibilitar a incorporação de aditivos e reforços, como o Versify, que melhora as propriedades mecânicas e a resistência ao impacto (FENG et al., 2020). A escolha do processo adequado está diretamente ligada à aplicação pretendida para o compósito, sendo necessária uma análise criteriosa das características dos materiais utilizados.

Diante disso, a produção de madeira plástica a partir de resíduos reciclados oferece uma solução sustentável para o reaproveitamento de materiais descartados, ao mesmo tempo em que se alinha às exigências de mercado por produtos de maior desempenho mecânico e durabilidade. O presente trabalho tem como objetivo investigar as propriedades mecânicas e o comportamento de compósitos produzidos com diferentes proporções de serragem e polímeros reciclados, além de avaliar a eficácia do uso de compatibilizantes no aumento da coesão entre os componentes. Espera-se que os resultados desta pesquisa contribuam para a literatura existente e forneçam subsídios para o desenvolvimento de novos materiais que combinem sustentabilidade e alta performance.

1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA

A crescente demanda por soluções sustentáveis e na necessidade de dar destinação adequada aos resíduos plásticos e de madeira, que representam um grave problema ambiental, são a justificativa para o estudo dos compósitos de madeira plástica. De acordo com Carnietto (2020) e Kieling et al. (2019), a produção de madeira plástica é uma alternativa viável para a mitigação desses resíduos, uma vez que combina sustentabilidade com alta durabilidade, ampliando a vida útil do plástico e reaproveitando resíduos de serragem que seriam descartados. Isso reduz a dependência de materiais virgens e favorece a economia circular, como destacado

por Vantsi (2015), que aponta as vantagens econômicas e ambientais do uso de materiais reciclados.

O problema que motiva esta pesquisa está relacionado à variabilidade dos resíduos disponíveis para a produção de compósitos, que pode impactar diretamente nas propriedades mecânicas e físicas da madeira plástica. Miranda (2020) observou que a contaminação dos resíduos plásticos pós-consumo e a inconsistência das fibras de madeira podem comprometer a qualidade do produto final. Isso torna essencial o desenvolvimento de um processo de triagem e purificação adequado para garantir a uniformidade dos materiais utilizados. Além disso, a compatibilidade entre os polímeros reciclados e as fibras de madeira é um dos maiores desafios, como apontam Kieling et al. (2019) e Mattos e Francisquetti (2018), sendo necessária a utilização de aditivos compatibilizantes para melhorar a adesão interfacial e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas do compósito.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objeto geral comparar as propriedades mecânicas, térmicas, e reológicas de um compósito madeira-polímero, confeccionados a partir de serragem de *pinus* e resíduos de reciclado.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar a composição dos resíduos de reciclado;
- b) caracterizar o tamanho das partículas, da serragem e dos resíduos do reciclado;
- c) obter os compósitos de madeira plástica em diferentes composições, com percentuais de 10, 20 e 30% em massa de serragem;
- d) avaliar a utilização de aditivo modificador de impacto;
- e) avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos produzidos;
- f) determinar a influência da serragem no índice de fluidez do compósito;
- g) determinar a microestrutura do compósito através de microscopia eletrônica de varredura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GESTÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS URBANOS

A gestão de resíduos plásticos urbanos é um dos principais desafios ambientais enfrentados por sociedades contemporâneas devido ao aumento contínuo no uso de plásticos e seu descarte inadequado. Os plásticos, devido à sua versatilidade e baixo custo, são amplamente utilizados em embalagens e produtos descartáveis, mas apresentam uma lenta degradação, com impacto ambiental prolongado. Estima-se que plásticos podem levar entre 100 e 400 anos para se decompor, representando um passivo ambiental significativo. Este tópico explora os desafios da gestão de resíduos plásticos, os entraves à reciclagem e as oportunidades oferecidas pela economia circular e pelos compósitos de plásticos reciclados (ABIPLAS, 2024; FERREIRA, 2020; POLETTO, 2017).

Os resíduos plásticos urbanos são compostos majoritariamente por polímeros como polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), polipropileno (PP), poliestireno (PS), policloreto de vinila (PVC) e tereftalato de polietileno (PET). Esses materiais são amplamente utilizados em embalagens e produtos descartáveis, como sacolas, garrafas, tampas e recipientes. Como apresentado no Quadro 1, esses polímeros possuem propriedades distintas que influenciam tanto seu comportamento no ambiente quanto suas possibilidades de reciclagem. O PET, por exemplo, amplamente usado em garrafas de bebidas, é um dos plásticos mais reciclados, mas apresenta desafios relacionados à contaminação e ao processamento (ABIPLAS, 2024; FERREIRA, 2020).

Os resíduos plásticos, quando descartados de forma inadequada, afetam não apenas o ambiente, mas também a saúde pública. A poluição por plásticos é amplamente documentada, com microplásticos, como apresentado por Mejjad et al. (2024), sendo encontrados em corpos d'água, solos e até na água potável. A reciclagem é um processo fundamental na gestão sustentável de resíduos, que visa a redução do impacto ambiental causado pelo descarte inadequado de materiais.

Quadro 1- Principais polímeros encontrados nos resíduos plásticos.

Polímero	Uso Principal	Tempo de Decomposição	Desafios na Reciclagem
PEAD (Poliétileno de Alta Densidade)	Embalagens rígidas (garrafas, tambores)	100-200 anos	Alta resistência térmica, difícil reciclagem completa
PEBD (Poliétileno de Baixa Densidade)	Sacolas, filmes plásticos	50-100 anos	Alta flexibilidade, contaminação por alimentos
PP (Polipropileno)	Tampas de garrafa, embalagens	100-300 anos	Degradação mais lenta, separação complexa
PS (Poliestireno)	Isopor, embalagens de alimentos	500 anos	Reciclabilidade limitada devido à fragilidade
PVC (Policloreto de Vinila)	Tubulações, revestimentos	400-600 anos	Liberção de dioxinas tóxicas na incineração
PET (Tereftalato de Poliétileno)	Garrafas de bebidas, embalagens transparentes	450 anos	Contaminação por resíduos de alimentos, demanda alta de energia no processo de reciclagem

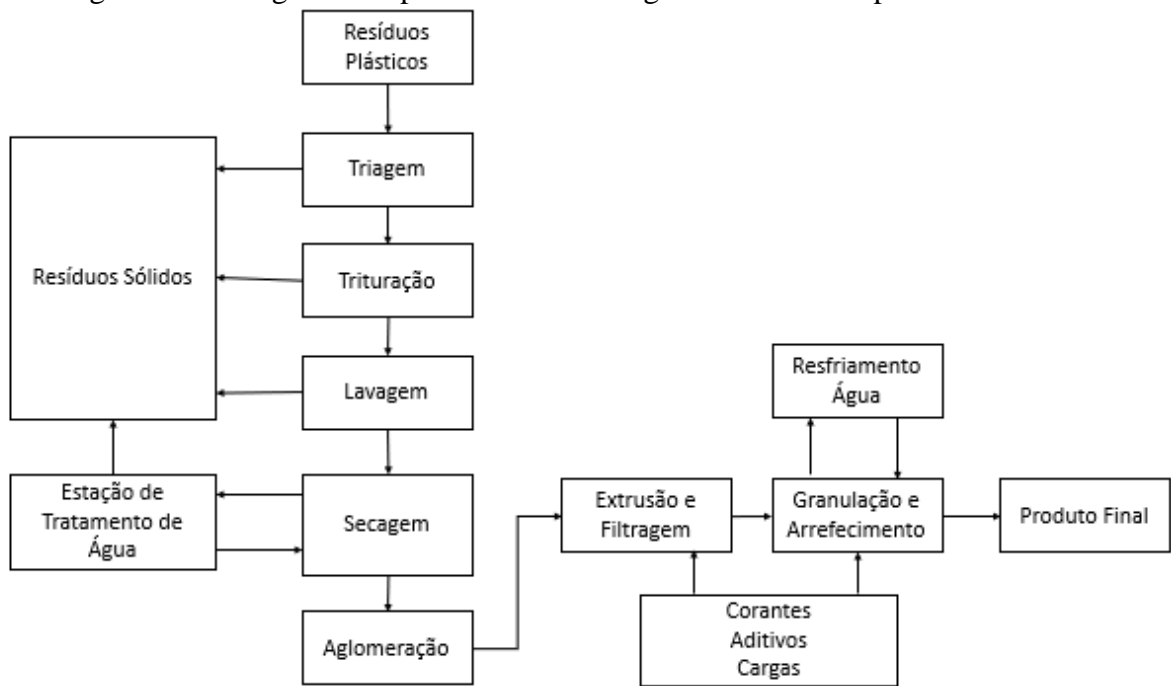
Fonte: ABIPLAS (2024).

No contexto atual de crescente produção e consumo de produtos plásticos, a reciclagem se torna ainda mais relevante, pois permite a recuperação de recursos valiosos e a redução da necessidade de matérias-primas virgens. Existem diferentes tipos de reciclagem, cada um com suas próprias técnicas e aplicações, que incluem a reciclagem mecânica, química e energética. Essas metodologias não apenas ajudam a mitigar os efeitos negativos dos resíduos no meio ambiente, mas também promovem a economia circular, criando novos produtos a partir de materiais reciclados e contribuindo para uma sociedade mais sustentável (SANADI et al 2023; ABDI,2021; POLETTO, 2017; GUIMARAES, 2013).

A reciclagem mecânica é o método mais comum de reciclagem de plásticos, utilizando processos físicos para converter resíduos em novos produtos, como descrito por Mello (2021) e Costa (2018). O fluxograma apresentado na Figura 1, apresenta essas etapas. Inicialmente, os resíduos de plásticos são coletados e passam por uma triagem, onde são classificados por tipo de polímero, removendo materiais indesejados. Em seguida, ocorre a trituração, transformando os plásticos em pequenos pedaços ou *flakes*. Após essa etapa, os *flakes* são submetidos à lavagem, para remover impurezas e contaminantes, com o efluente sendo tratado em uma estação de tratamento de água. O material lavado é seco e segue para a aglomeração, onde os plásticos são compactados. Posteriormente, o material é processado por extrusão e filtragem,

onde podem ser adicionados corantes, aditivos e cargas para melhorar suas propriedades. O processo continua com a granulação e resfriamento, geralmente em água, formando grânulos ou pellets, que compõem o produto final. Esses grânulos podem ser reutilizados em diversos processos de moldagem, como injeção ou compressão, criando novos produtos plásticos e promovendo a sustentabilidade através da reciclagem mecânica (MELLO, 2021; COSTA, 2018).

Figura 1 - Fluxograma do processo de reciclagem mecânica de plásticos.



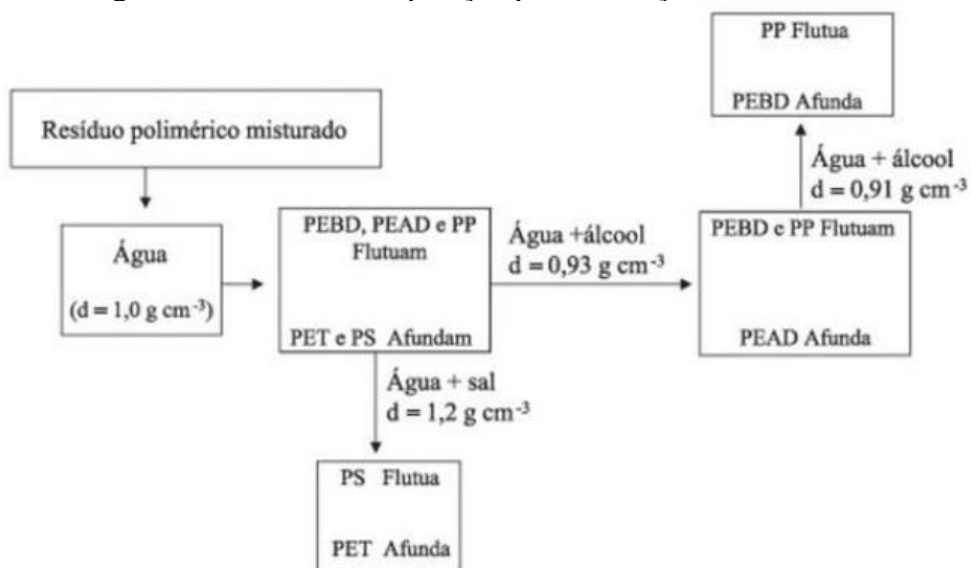
Fonte: Adaptado de Mello (2021).

A principal vantagem da reciclagem mecânica é a preservação da estrutura química dos polímeros, permitindo que os plásticos reciclados mantenham muitas de suas propriedades originais. Isso torna o processo adequado para a produção de uma ampla gama de produtos, desde embalagens e sacolas até componentes de madeira plástica e peças automotivas. No entanto, um dos desafios desse tipo de reciclagem é a degradação da qualidade do plástico após múltiplos ciclos de reciclagem, o que pode limitar seu uso em aplicações de alta performance (ALVES et al 2022; ALMEIDA, 2013).

A reciclagem mecânica de separação por densidade, como apresentado no fluxograma na Figura 2, conforme Ferreira (2020), descreve o processo de separação de polímeros por densidade, um método eficaz utilizado na reciclagem mecânica para classificar diferentes tipos

de plásticos presentes em resíduos misturados. Inicialmente, o material polimérico é imerso em água (densidade de $1,0 \text{ g/cm}^3$), onde polímeros com densidade inferior, como PEBD (polietileno de baixa densidade), PEAD (polietileno de alta densidade) e PP (polipropileno), flutuam, enquanto polímeros mais densos, como PET (politereftalato de etileno) e PS (poliestireno), afundam. Em seguida, uma solução de água com sal, com densidade de $1,2 \text{ g/cm}^3$, é utilizada para separar o PS, que flutua, do PET, que afunda. Para os polímeros que flutuaram inicialmente, como PEBD, PEAD e PP, uma solução de água com álcool é usada para distinguir esses materiais: em uma solução de $0,93 \text{ g/cm}^3$, PEBD e PP flutuam, e o PEAD afunda; em uma solução de $0,91 \text{ g/cm}^3$, apenas o PP flutua, completando a separação. Esse processo é essencial para a reciclagem eficiente, pois facilita a classificação dos materiais com base em suas propriedades físicas, aumentando a pureza dos plásticos reciclados e otimizando seu processamento subsequente (ELSHEIKH et al 2022; FERREIRA, 2020).

Figura 2 - Processo de separação por diferença de densidade.



Fonte: Adaptado de Ferreira (2020).

Além disso, a reciclagem mecânica é geralmente mais econômica e energeticamente eficiente em comparação com outros tipos de reciclagem, como a química e a energética. Ela também tem menor impacto ambiental, pois reduz a necessidade de matérias-primas virgens e diminui a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários. No Brasil, esse método é amplamente utilizado e tem um papel crucial na gestão de resíduos plásticos, contribuindo para a economia circular e a sustentabilidade (ABIDI, 2021; ALMEIDA, 2018).

A reciclagem é uma prática essencial para a sustentabilidade ambiental e econômica, desempenhando um papel crucial na gestão de resíduos plásticos e de madeira. Com uma variedade de métodos, incluindo a reciclagem mecânica, química e energética, é possível transformar materiais descartados em novos produtos, reduzir a dependência de recursos naturais e minimizar os impactos negativos no meio ambiente (MELLO, 2021; GUIMARÃES, 2013).

No Brasil, os avanços nas técnicas de separação e processamento de resíduos, bem como as iniciativas de coleta seletiva, têm potencial para ampliar significativamente a eficiência e a abrangência da reciclagem. A produção de madeira plástica a partir de resíduos reciclados exemplifica como a inovação pode converter problemas ambientais em oportunidades econômicas e ecológicas. Continuar a investir em tecnologias de reciclagem e promover políticas públicas eficazes são passos fundamentais para alcançar um futuro mais sustentável (ABIDI, 2021).

2.2 PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS DE MADEIRA

O beneficiamento de toras de madeira, um processo essencial na indústria madeireira para a produção de produtos como madeira serrada, laminados e chapas de madeira, gera uma quantidade significativa de resíduos. Esses resíduos, compostos principalmente por serragem, cavacos e lascas, representam um desafio ambiental, mas também oferecem oportunidades valiosas para reutilização e reciclagem, contribuindo para a sustentabilidade do setor. Durante o processo de beneficiamento de toras, uma parcela significativa da madeira é convertida em resíduos. Estima-se que até 50% da matéria-prima de uma tora pode ser perdida na forma de resíduos como serragem, cavacos e pedaços irregulares. O Quadro 2 detalha os tipos mais comuns de resíduos gerados nesse processo e suas possíveis aplicações (KIELING et al 2019; ALMEIDA, 2013; IPT, 2021).

A serragem, por exemplo, é amplamente gerada durante o corte e o desbaste da madeira e tem sido historicamente descartada ou queimada, o que pode causar impactos negativos, como poluição do ar. No entanto, com o avanço das tecnologias de reciclagem e valorização de resíduos, essa biomassa tem ganhado novas aplicações, particularmente na produção de compósitos e em outras indústrias, como a de bioenergia (CASTRO et al, 2018; IPT, 2021).

Quadro 2 - Tipos de resíduos de madeira e possíveis aplicações.

Tipo de Resíduo	Descrição	Proporção da tora	Possíveis aplicações
Serragem	Partículas finas resultantes do corte	10-20%	Compósitos de madeira plástica, briquetes, substrato agrícola
Cavacos	Fragmentos maiores de madeira	15-30%	Produção de papel, MDF, energia (biomassa)
Lascas	Pedaços irregulares	5-10%	Painéis de madeira aglomerada, biocombustíveis

Fonte: Almeida (2013).

A gestão de resíduos de madeira enfrenta desafios relacionados ao volume e à natureza irregular dos materiais gerados. Em serrarias de grande porte, o manejo adequado desses resíduos é essencial para evitar o acúmulo e os custos associados ao descarte inadequado. A falta de infraestrutura em algumas regiões também dificulta o aproveitamento eficaz desses resíduos, levando ao descarte ou à queima sem controle (IPT, 2021). Além disso, a composição química e física desses resíduos varia conforme a espécie da madeira e o tipo de processamento aplicado, o que pode influenciar as estratégias de reaproveitamento.

Diversas soluções sustentáveis têm sido implementadas para transformar os resíduos de madeira em recursos valiosos. Uma das mais promissoras é a incorporação da serragem e dos cavacos em compósitos de madeira plástica (WPCs). Esses materiais, que combinam resíduos de madeira com polímeros reciclados, oferecem vantagens ambientais e econômicas, pois reduzem a necessidade de matéria-prima virgem e criam produtos de alto desempenho para aplicações como mobiliário urbano e construção civil. Além disso, os resíduos de madeira podem ser utilizados na produção de briquetes e pellets, fontes de bioenergia que têm atraído atenção como alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis. A utilização desses materiais em processos de geração de energia contribui para a redução das emissões de carbono e para o aproveitamento integral da biomassa gerada na indústria madeireira (OLIVEIRA E MULINARI, 2014; SBRT, 2013)

O avanço das tecnologias de reciclagem e valorização de resíduos abre novas oportunidades para o setor madeireiro, permitindo uma gestão mais eficiente e sustentável dos resíduos gerados. Conforme Lopes et al. (2021), o desenvolvimento de compósitos, biocombustíveis e outros produtos a partir de resíduos de madeira tem o potencial de transformar um passivo ambiental em um recurso economicamente viável e ambientalmente benéfico. No entanto, para maximizar o aproveitamento desses resíduos, é necessário continuar

investindo em infraestrutura, inovação tecnológica e políticas públicas que incentivem a adoção de práticas de economia circular. A integração de resíduos de madeira na cadeia produtiva pode contribuir significativamente para a sustentabilidade da indústria e para a mitigação dos impactos ambientais associados ao beneficiamento de toras.

2.3 COMPÓSITOS DE MADEIRA PLÁSTICA

Madeira plástica conforme o Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, podem ser definidas como produtos manufaturados com conteúdo de plástico superior a 50% em massa e que possuem genericamente seção retangular e apresentam dimensões típicas dos produtos de madeira industrializada. Foi desenvolvida na Europa na década de 70, na década de 90 se popularizou em todos os países inclusive no Brasil. O material madeira plástica, foi ampliado para produtos com outras seções transversais e outros formatos, para atender necessidades de aplicação, como apresentado na Figura 3 (OLIVEIRA E MULINARI, 2014; SBRT, 2013; KIELING et al 2019).

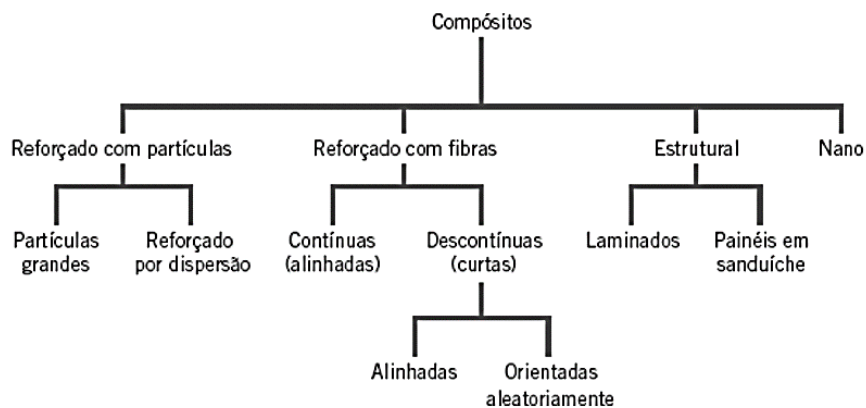
Figura 3 - Produtos de madeira plástica



Fonte: Oliveira e Mulinari (2014).

A madeira plástica, segundo Kieling et al (2019), é um material compósito que apresenta em sua composição uma mistura de serragem ou fibras de madeira e polímeros. De acordo com D' Aguiar (2017), um compósito é formado por dois ou mais materiais, também chamados de fases, no qual uma das fases, mais rígida e mais resistente é denominada reforço, enquanto a fase menos rígida, mais fraca e contínua é a matriz. Callister e Rethwisch (2016), classificam os materiais compósitos em quatro categorias principais com base no tipo de reforço e na estrutura: reforçado com partículas, reforçado com fibras, estrutural, e nano, como apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Esquema de classificação para vários tipos de compósitos.



Fonte: Callister e Rethwisch (2016).

Os compósitos reforçados com partículas podem incluir partículas grandes ou finamente dispersas para melhorar a resistência e outras propriedades. Os compósitos reforçados com fibras podem ter fibras contínuas (alinhadas) ou descontínuas (curtas), que podem ser alinhadas ou orientadas aleatoriamente, oferecendo maior resistência mecânica e rigidez. Os compósitos estruturais são divididos em laminados e painéis em sanduíche, combinando diferentes materiais para formar estruturas com alta resistência e rigidez. Os compósitos nano utilizam reforços em escala nanométrica para melhorias significativas em propriedades como resistência e durabilidade. A madeira plástica, conforme Almeida (2018), se enquadra principalmente na categoria de compósitos reforçados com partículas, onde resíduos de madeira, como serragem ou pó de MDF, são combinados com polímeros para criar um material durável e resistente, adequado para diversas aplicações industriais e domésticas. Para a estrutura da madeira plástica, conforme Gonçalves et al (2019), os termoplásticos constituem a matriz e a madeira o reforço.

A madeira plástica é um produto que pode ser preparado a partir de resíduos reciclados de polímeros, compostos vegetais ou compostos minerais. Essas formulações têm o propósito de melhorar as propriedades físicas, mecânicas para atender as especificações de utilização em um maior número de aplicações (ALMEIDA, 2013; COSTA, 2018). Referente a madeira a principal origem, são os resíduos de processamento da indústria madeireira e moveleira, principalmente de espécies de reflorestamento, que podem ser: pó (resíduos de polimento de madeiras), serragem (resíduo de operações de corte com serras), maravalha (resíduo de operações de plainas e beneficiadoras de madeira) (KIELING et al 2019; NAZARIO et al 2016).

Os polímeros utilizados na fabricação da madeira plástica por serem usualmente plásticos reciclados, denominam este tipo de material como “Recycled Plastic Lumber” (RPL). A maior parte da madeira plástica disponível no mercado é fabricada a partir de, predominantemente PEAD, podendo ser utilizadas misturas de PEAD, PEBD, polipropileno (PP), poli(acrilonitrila co-butadieno-co-estireno) (ABS), poli(cloreto de viníla) (PVC) e outros plásticos (SANTOS et al, 2019; GUIMARÃES, 2013; OLIVEIRA e MULINARI, 2014; MARTINS, 2017). Segundo Poletto (2017), os materiais poliméricos utilizados para produção de madeira plástica, tem um fator limitante para a utilização como matriz em compósitos reforçados com fibras naturais, a temperatura de processamento, a qual deve geralmente ser inferior a 200°C para evitar a degradação térmica das fibras naturais.

A combinação de características dos termoplásticos e da madeira, propiciam vantagens desse produto em relação à madeira natural, como não trinca, não empena, não é atacada por fungos, não absorve umidade, ser resistente a agentes químicos em geral, exigir pouca ou nenhuma manutenção, algumas características comparativas são mostradas na Figura 5 (BRITO et. al, 2021; ALMEIDA et. al., 2014). E por ser facilmente moldado em formas complexas, ter baixo consumo energético em sua produção, ser reciclável a coloca como um potencial produto para substituição de materiais tradicionais como madeira natural, aço ou concreto (BRAND E FRIDLEY, 2003; ALMEIDA, 2018).

Figura 5 - Comparativo entre madeira plástica e natural.



Fonte: Adaptado de Brito (2021).

Para Guimarães et al (2018), a utilização da madeira plástica fabricada a partir de matérias primas reutilizáveis torna o material ecologicamente correto, contribuindo para redução de custos, desmatamentos de florestas e maior facilidade para conseguir material de produção.

2.4 PRODUÇÃO DE MADEIRA PLÁSTICA

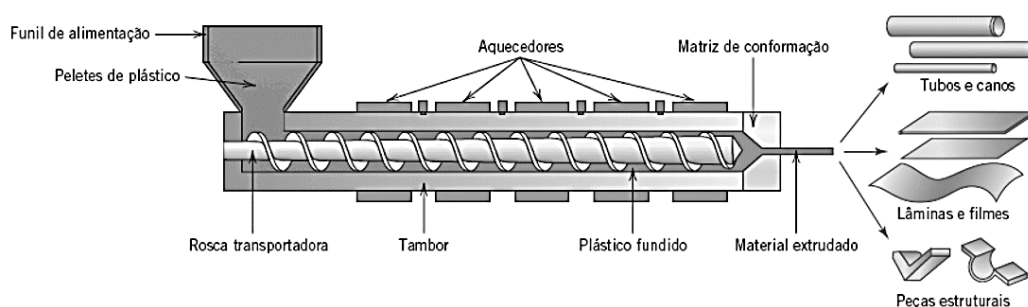
Um dos principais desafios na aplicação da madeira plástica é aprimorar seu desempenho físico e mecânico, que depende diretamente dos materiais empregados em sua fabricação, como o tipo de polímero, fibras de madeira ou resíduos, e a presença de aditivos. A seleção apropriada desses componentes é essencial para alcançar propriedades desejáveis, como alta resistência à tração, flexão e impacto, além de garantir durabilidade e resistência a condições ambientais adversas. Outro fator crucial é a compatibilidade interfacial entre os polímeros e as fibras naturais, que influencia a coesão da matriz do compósito e, conseqüentemente, o seu desempenho, técnicas de modificação de superfície, como o uso de compatibilizantes, têm sido amplamente investigadas, pois melhoram a adesão interfacial, resultando em melhorias nas propriedades mecânicas, possibilitando seu uso em setores como a construção civil, mobiliário urbano e indústrias automotivas (KIELING et al., 2019; FLETES et al., 2020; FENG et al., 2020).

A otimização da granulometria dos componentes e o uso de aditivos são estratégias fundamentais para aprimorar tanto a processabilidade quanto a qualidade final do compósito.

As proporções dos materiais, o processamento e os equipamentos utilizados na fabricação também têm um impacto direto na qualidade da madeira plástica produzida. Entre os diversos métodos de fabricação, destacam-se os processos de compressão e extrusão, ambos realizados sob altas pressões e temperaturas, garantindo a coesão e resistência do produto final. (ASHORI et al 2023; ROSSINO et al 2019).

No processo de extrusão, as matérias-primas são misturadas em uma extrusora, equipamento que mistura os componentes a temperatura de fusão seguida por operação de injeção em moldes para dar forma aos objetos. O processo de extrusão consiste na moldagem de um termoplástico viscoso sob pressão por meio de uma matriz com extremidade aberta. Onde uma rosca ou parafuso sem fim transporta o material peletizado através de uma câmara, onde ele é sucessivamente compactado, fundido e conformado como uma carga contínua de um fluido viscoso, uma representação é mostrada na Figura 6 (MONTANES et al 2019; CALLISTER e RETHWISCH, 2016; YAMAJI, 2004).

Figura 6 - Representação do processo de extrusão.



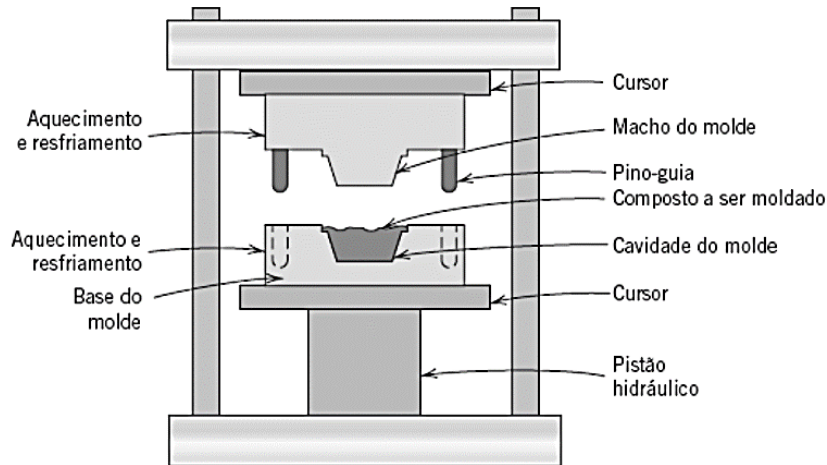
Fonte: Callister e Rethwisch (2016).

A extrusão ocorre conforme essa massa fundida é forçada através de um orifício na matriz. A solidificação do segmento extrudado é acelerada por sopradores de ar, por um borrifador de água, ou por um banho. A técnica é especialmente adaptada para produzir peças contínuas com seção transversal de geometria constante por exemplo, barras, tubos, mangueiras, placas e filamentos (CALLISTER e RETHWISCH, 2016; YAMAJI, 2004).

Nos processos de fabricação por compressão, o composto a ser moldado é colocado entre as partes macho e fêmea do molde, como mostrado na Figura 7. Ambas as partes do molde são aquecidas, mas apenas uma delas é móvel. O molde é então fechado, e calor e pressão são aplicados, fazendo com que o plástico se torne viscoso e flua para assumir a forma do molde.

Antes da moldagem, as matérias-primas podem ser misturadas e prensadas a frio para formar um disco, chamado de pré-forma. O preaquecimento da pré-forma reduz o tempo e a pressão de moldagem, prolonga a vida útil do molde e resulta em uma peça acabada uniforme (CALLISTER e RETHWISCH, 2016; YAMAJI, 2004).

Figura 7 - Representação do processo de compressão.



Fonte: Callister e Rethwisch (2016).

Os compósitos de madeira-plástico são amplamente utilizados em aplicações onde durabilidade e resistência são essenciais, e para otimizar suas propriedades e o processo de fabricação, é comum a adição de diversos aditivos e compatibilizantes. Como principais materiais para produção de madeira plástica Almeida (2013), destaca: Polipropileno, é um polímero termoplástico amplamente utilizado por suas propriedades mecânicas equilibradas, boa resistência à tração e rigidez. É conhecido por ser leve, resistente à umidade e aos produtos químicos, tornando-se um material ideal para diversas aplicações industriais; plásticos reciclados, apresentam características similares ao PP virgem, mas pode ter propriedades ligeiramente inferiores devido à sua vida útil anterior e à possível degradação durante os processos de uso e reciclagem. Seu uso contribui para a sustentabilidade ao reduzir a necessidade de novos polímeros e permitir a reutilização de plásticos pós-consumo; Serragem de madeira, é um material natural, renovável, utilizado como carga no compósito. Além de melhorar as propriedades mecânicas do material, a serragem confere características estéticas e ambientais, além de ajudar a reduzir a densidade e o custo do produto final.

Quanto ao uso de aditivos, o Quadro 3, mostra os principais aditivos e funções. Os plastificantes aumentam a flexibilidade do material, enquanto os estabilizadores térmicos evitam a decomposição durante o aquecimento no processamento e os estabilizadores UV protegem contra a degradação causada pela exposição ao sol. Retardadores de chamas são adicionados para reduzir a inflamabilidade do compósito, e lubrificantes são utilizados para facilitar o fluxo do material durante a extrusão, reduzindo a viscosidade. A carga aumenta a resistência ao desgaste e reduz os custos de produção, substituindo parte do polímero, enquanto os antioxidantes minimizam a oxidação causada pelo oxigênio e ozônio, prolongando a vida útil do material. Pigmentos são usados para conferir a cor desejada sem a necessidade de pintura posterior, e os antiestáticos evitam a eletrização por atrito, melhorando a segurança. Em alguns casos, são adicionados aromatizantes para neutralizar odores desagradáveis e melhorar a experiência sensorial, e biocidas são incorporados para inibir a degradação por microrganismos, sendo essenciais em aplicações externas onde há maior exposição à umidade. Esses aditivos, portanto, desempenham um papel crucial na melhoria da processabilidade, estabilidade ambiental e propriedades mecânicas dos WPCs, tornando-os adequados para uma ampla gama de aplicações em ambientes internos e externos (SEO et al 2023; CASTRO et al, 2016).

Quadro 3 - Principais aditivos e funções.

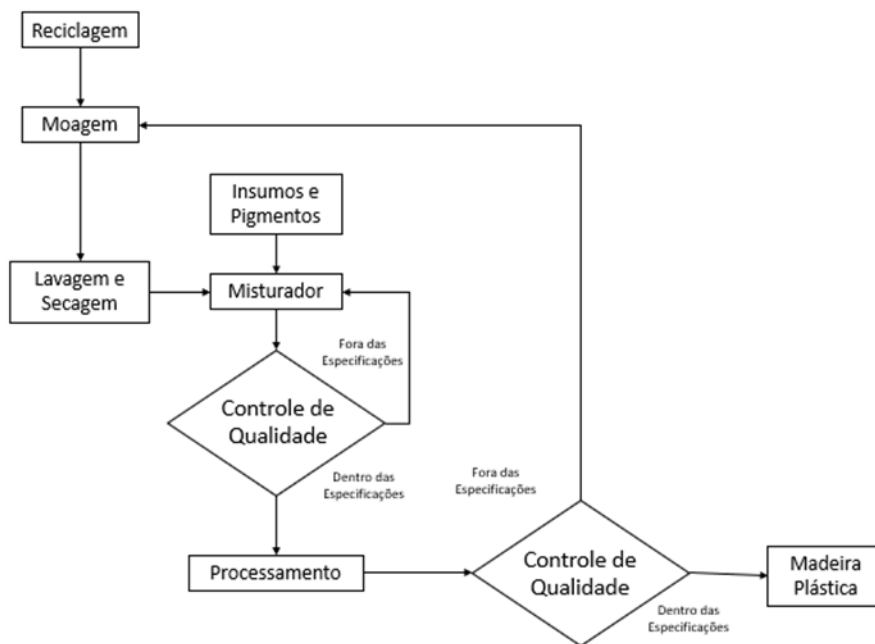
Aditivo	Função
Plastificante	Aumentar a flexibilidade
Estabilizador térmico	Evitar a decomposição por aquecimento
Estabilizador UV	Evitar a decomposição causada por raios UV solares
Retardador de chamas	Reduzir inflamabilidade
Lubrificante	Reduzir a viscosidade
Carga	Aumentar a resistência ao desgaste por abrasão e reduzir o custo do material
Antioxidante	Minimizar a oxidação provocada por oxigênio e ozônio atmosféricos.
Pigmentos	Conferir a cor desejada
Antiestático	Evitar eletrização por atrito
Aromatizante	Conferir odores desejados.
Biocida	Inibir a degradação por microrganismos

Fonte: Castro et al (2018).

Materiais como: PP-Mga (Anidrido Maleico) amplamente utilizado como agente compatibilizante, facilitando a adesão entre a matriz de PP e as fibras de madeira (serragem). Ele melhora a interação interfacial, aumentando a coesão entre os componentes do compósito, resultando em melhores propriedades mecânicas; Struktol TPW 113, este aditivo atua como um agente dispersante e lubrificante, melhorando o processamento do compósito e facilitando o fluxo do material durante a extrusão. Ele também ajuda a melhorar a distribuição homogênea das cargas no polímero; Versify, um elastômero que é utilizado para melhorar as propriedades de impacto e a flexibilidade do compósito. Ele confere maior resistência ao impacto e reduz a fragilidade, proporcionando um material final mais robusto e durável (KIELING et al., 2019; FLETES et al., 2020; FENG et al., 2020; CASTRO et al. 2016).

Os processos de produção de madeira plástica, são cruciais para transformar resíduos de madeira e plásticos reciclados em compósitos de alto desempenho. As etapas do processo produtivo são mostradas na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma da produção da madeira plástica.



Fonte: Adaptado de Brito et al (2021).

A produção da madeira plástica com materiais reciclados, envolve diversas etapas destacando as principais, começando com a reciclagem do plástico, que é o principal insumo.

Em seguida, o material reciclado passa pela moagem, para homogeneizar a mistura e facilitar o processamento. Após isso, o plástico é higienizado, removendo impurezas e neutralizando possíveis contaminantes químicos. No misturador, são adicionados os insumos necessários para o processo, como a serragem, aditivos e corantes. A etapa de controle de qualidade garante que a matéria-prima esteja dentro das especificações antes de prosseguir para a extrusão, ou prensagem, onde o material é moldado. Finalmente, um segundo controle de qualidade verifica se os requisitos foram atendidos, resultando na obtenção da madeira plástica. (BRITO et al 2021).

A composição desses compósitos pode variar, incorporando partículas grandes, fibras descontínuas ou até mesmo reforços nanométricos, cada uma conferindo propriedades específicas ao material final. A escolha do processo e da composição adequados é crucial para otimizar as características mecânicas e físicas do produto, atendendo às exigências de diferentes aplicações industriais e domésticas. A inovação contínua nos métodos de produção e na formulação de compósitos possibilita expandir ainda mais a sua utilização (PATTI et al 2021; GONÇALVES et al 2019; GENTIL JUNIOR, 2019).

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os materiais apresentados na Tabela 1, e os materiais utilizados como matriz e carga no compósito são mostrados na Figura 9.

Tabela 1 - Materiais utilizados.

Material	Função	Origem
Polipropileno Virgem (PP): RP 347 Braskem	Matriz do compósito	Braskem
Plástico Reciclado (RP) Fleike	Matriz do Compósito	Usina de reciclagem Serafina Correa -RS
Serragem de Madeira (RM) <i>Pinus elliottii</i>	Reforço no Compósito	Madeireira Guaporé-RS
PP-Mga (Anidrido Maleico)	Aditivo	Dow
Struktol TPW 113	Aditivo	Dow
Versify 3300	Aditivo	Dow

Fonte: O Autor (2024).

Figura 9 – PP Virgem (a), Plásticos reciclados (b), serragem (c).



Fonte: O Autor (2024).

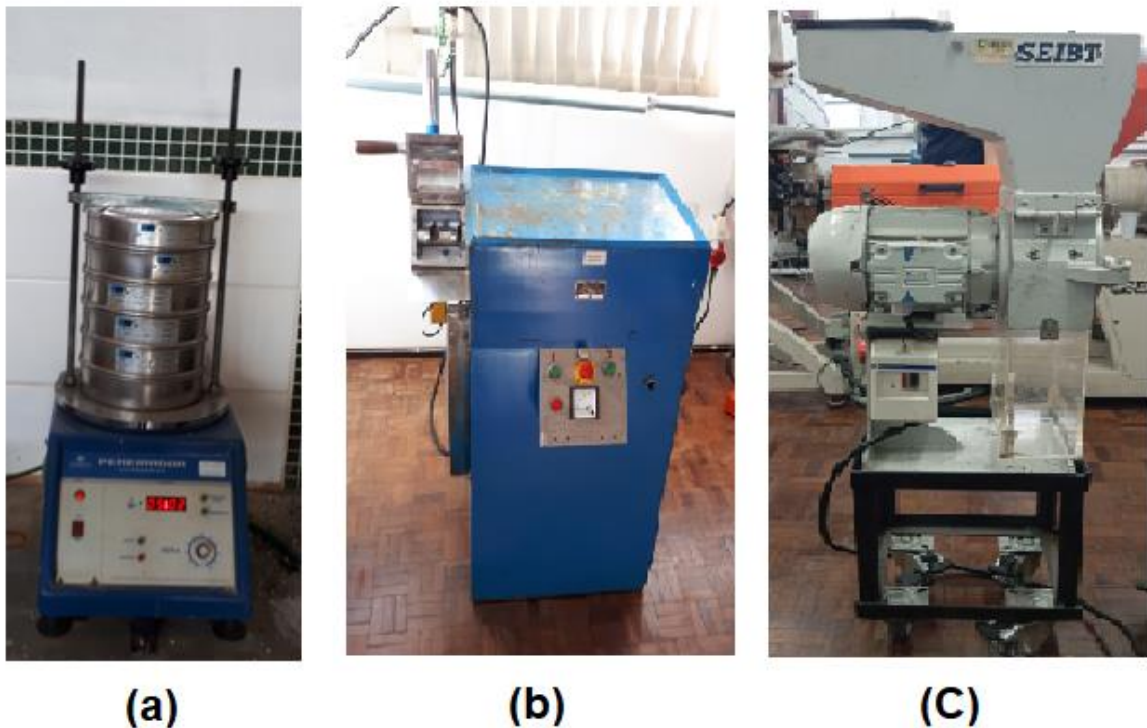
Esses materiais, combinados, permitem o desenvolvimento de um compósito com características aprimoradas, tanto do ponto de vista mecânico quanto ambiental, promovendo a sustentabilidade ao incorporar materiais reciclados e naturais.

3.2 METODOLOGIA

Os resíduos de madeira, a serragem, e os plásticos reciclados, foram caracterizados quanto ao tamanho de partículas por meio de análise granulométrica, utilizando conjunto de peneiras Bertel, que variavam de 1,7 mm a 0,06 mm, para a serragem e de 6,3 mm a 0,3 mm para os plásticos reciclados, e agitador magnético Contenco, apresentado na Figura 10(a), a fim de identificar os tamanhos de partículas predominantes.

Os compósitos foram preparados utilizando um misturador intensivo tipo Dryser, Figura 10 (b), seguindo as proporções especificadas na Tabela 2. Após a mistura, os compósitos foram moídos utilizando um moinho de facas da marca Seibt, Figura 10 (c). O material moído foi então seco em estufa com circulação de ar a 60°C por 24 horas.

Figura 10 – Equipamentos para preparação do compósito.



Fonte: O Autor (2024).

Tabela 2 - Composição das amostras produzidas.

Amostra		Materiais						
		PP	RP	RM	Anidrido Maleico	Struktoll	Versify	Total
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Referência	PP	100	0	0	0	0	0	100
	RP	0	100	0	0	0	0	100
Polipropileno + Serragem	P1	87	0	10	1	2	0	100
	P2	77	0	20	1	2	0	100
	P3	67	0	30	1	2	0	100
Plástico Reciclado + Serragem	R1	0	87	10	1	2	0	100
	R2	0	77	20	1	2	0	100
	R3	0	67	30	1	2	0	100
Plástico Reciclado + Serragem + Versify	RV1	0	77	10	1	2	10	100
	RV2	0	67	20	1	2	10	100
	RV3	0	57	30	1	2	10	100

Fonte: O Autor. (2024).

Para a caracterização dos compósitos, corpos de prova do tipo IV foram injetados de acordo com a norma ASTM-D-638, utilizando uma injetora Himaco modelo LHS 150-80. As temperaturas de injeção foram ajustadas para 150, 165 e 180°C nas três zonas de aquecimento, com 40% da potência no bico de injeção.

Os corpos de prova para ensaios de impacto foram produzidos conforme a norma ASTM D 256-06 e foram entalhados 7 dias após a injeção. Os ensaios de resistência ao impacto Izod foram realizados utilizando um equipamento Zwick modelo Q-580, com martelo de 4J, conforme norma ASTM D-256-06.

Os ensaios de resistência à tração foram realizados em uma máquina de ensaios universal EMIC DL 2000, conforme a norma ASTM D-638-1338, com uma velocidade de 50mm/min.

O índice de fluidez dos compósitos foi avaliado utilizando um Plastômetro MeltFlowQuik Index, conforme o método ASTM D1238. Este índice é definido pela quantidade de massa em gramas que flui em uma matriz durante 10 minutos, aplicando pressão à uma dada temperatura. O ensaio foi realizado a uma temperatura de 230°C com uma carga de 2,16kg. A cada minuto sendo retirada uma amostra que posteriormente era pesada, para ser feita a conversão para o peso em 10 minutos. Foram feitas 5 medidas de cada compósito, com os resultados foi calculado a média e o desvio padrão dos valores.

Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier acoplado à Reflexão atenuada (FTIR-ATR), realizada com equipamento Perkin Elmer Frontier 100, foram realizadas 15 varreduras de 4000 a 650 cm^{-1} para cada amostra.

A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foi realizada em corpos de prova fraturados nos ensaios de impacto. As amostras foram analisadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura MEV TM3000 da Hitachi, operando a uma tensão de aceleração de 5kV. As amostras foram preparadas sobre um suporte de 70mm de diâmetro e 50mm de altura, utilizando fita de carbono e cobre para fixação. As imagens foram coletadas com uma ampliação de 400x.

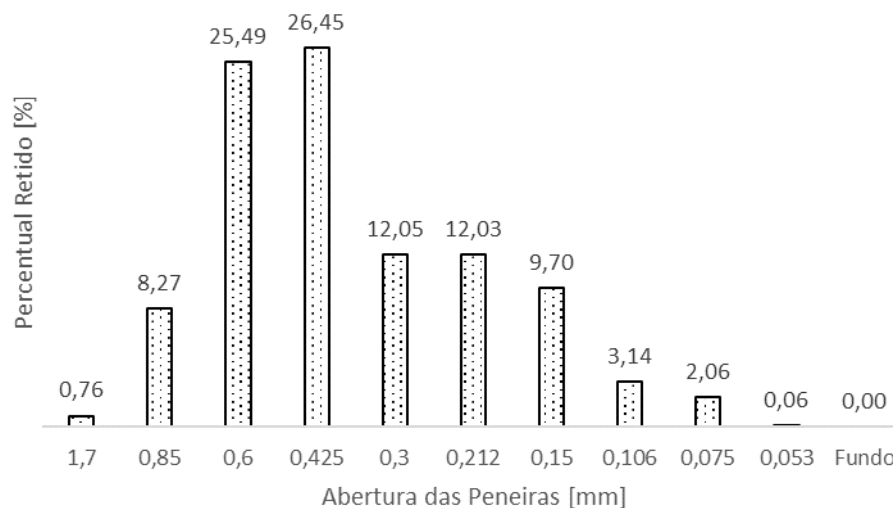
Estes métodos foram selecionados para permitir uma avaliação abrangente das propriedades mecânicas e estruturais dos compósitos madeira-plástico, visando determinar a viabilidade da utilização de resíduos como matérias-primas em aplicações industriais.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

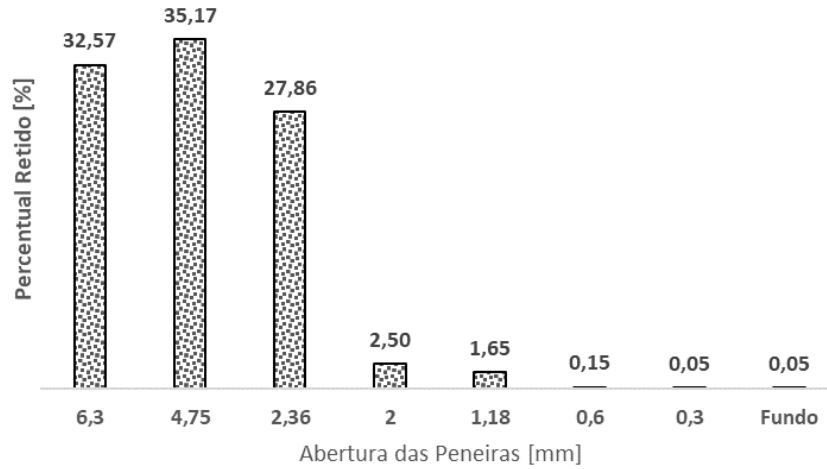
A análise granulométrica da serragem de madeira apresentada na Figura 11, e do plástico reciclado apresentada na Figura 12, demonstra que mais de 50% da serragem tem granulometria entre 0,6mm e 0,4mm sendo que 25,4% ficaram retidos na peneira de 0,6mm e 26,4%, retido na peneira de 0,425mm. A análise granulométrica dos plásticos reciclados, mostra que 95,6% das partículas do reciclado possuem granulometria entre 6,3mm a 2,36mm, sendo que 32,5% ficaram retidas na peneira de 6,3mm, 35,1% retidas na peneira de 4,75 mm e 27,8%, retidas na peneira de 2mm. A granulometria do resíduo de madeira, como avaliado por Prokrel et al (2021) e Scheeren et al (2020), é um fator importante a ser observado, pois contribui para homogeneidade entre as partículas e a matriz polimérica e facilita o processo de injeção, uma vez que partículas finas se acomodam melhor nos vazios da massa polimérica.

Figura 11 – Granulometria da serragem.



Fonte: O Autor (2024).

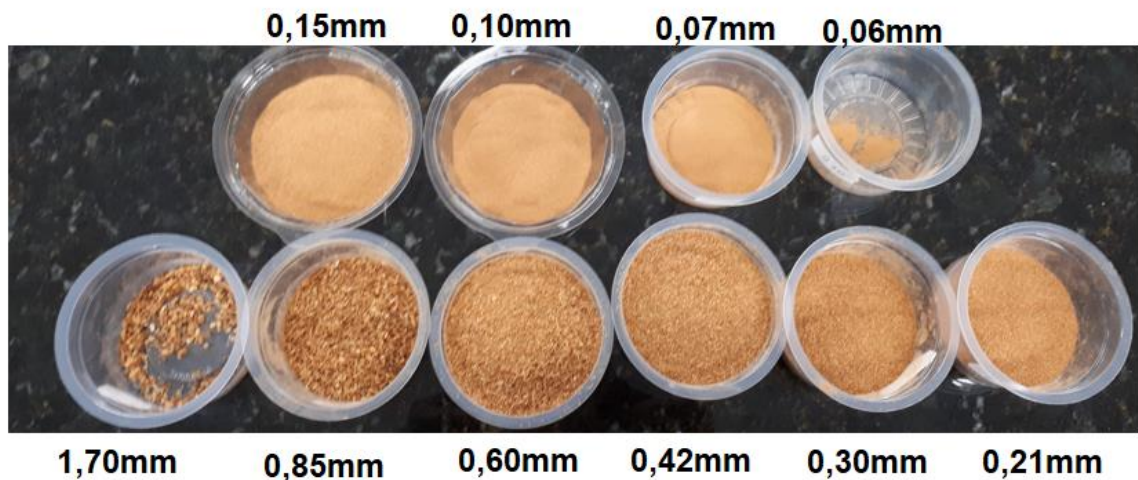
Figura 12 – Granulometria do plástico reciclado.



Fonte: O Autor (2024).

Conforme Fornari Junior (2017), a forma das partículas vegetais influencia diretamente as propriedades finais do compósito e se constitui em um dos fatores importantes na construção das suas características mecânicas, uma vez que a efetiva área superficial tem influência considerável sobre as propriedades finais do compósito, e é inversamente dependente do tamanho de partícula, ou seja, quanto menor o tamanho da partícula, maior será a área superficial disponível. A distribuição granulométrica das partículas de serragem é mostrada na Figura 13.

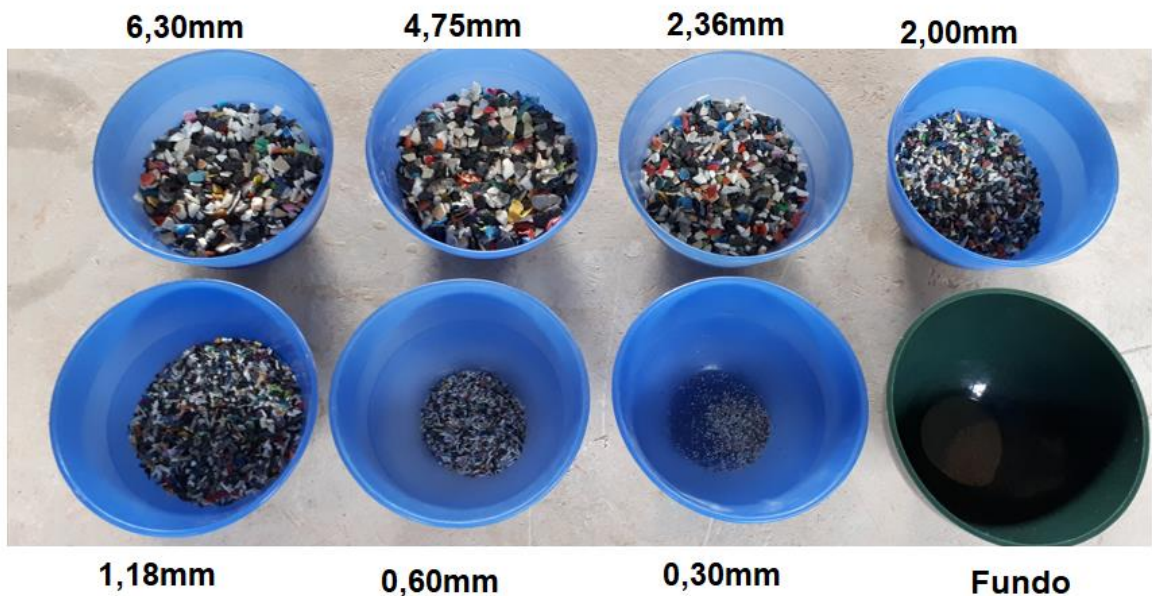
Figura 13. Imagem da distribuição granulométrica da serragem



Fonte: O Autor (2024).

O tamanho das partículas dos plásticos reciclados, é um parâmetro a ser observado para produção de madeira plástica. Conforme Silva (2019), durante o processamento das partículas de plásticos as com pequenas dimensões estão suscetíveis a queima comprometendo a qualidade do material final. A distribuição granulométrica das partículas do plástico reciclado é mostrada na Figura 14.

Figura 14 – Imagem da distribuição granulométrica do plástico reciclado.



Fonte: O Autor (2024).

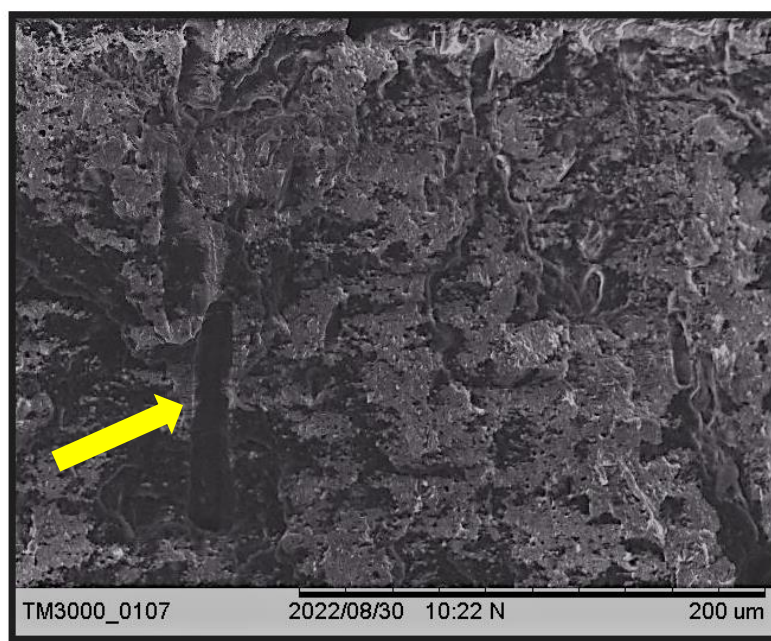
A combinação de uma granulometria do plástico reciclado, com a granulometria da serragem, devem ser o mais próximo possível para não gerar incompatibilidades na dispersão e adesão entre os materiais, comprometendo o desempenho do compósito, pois a otimização da mistura, fundamental para promover uma melhor distribuição na matriz plástica. Uma dispersão uniforme garante que as partículas de serragem sejam encapsuladas adequadamente, aumentando a resistência mecânica e a durabilidade do material final. As dimensões de partículas utilizadas conforme Figura 12, mostram, conforme Prokrel et al (2021) e Scheeren et al (2020), que pode ocorrer um bom equilíbrio entre resistência e processabilidade.

4.2 ANÁLISE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A Microscopia Eletrônica de Varredura possibilita avaliar a morfologia, entre as partículas de madeira e a matriz polimérica.

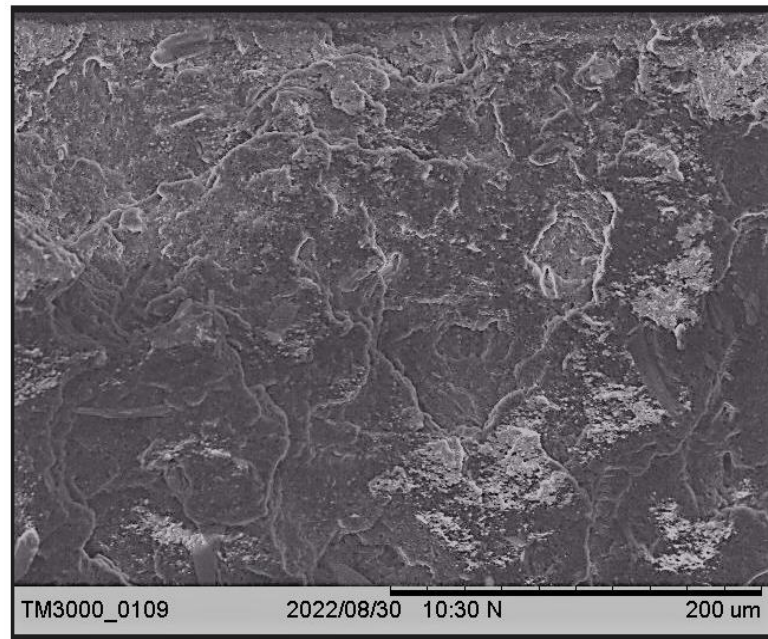
O polipropileno virgem + resíduos de madeira, com aumento de 400 X, as Figuras 15 a17, apresentam uma superfície relativamente lisa e homogênea nas três amostras P1, P2 e P3 se observa que a madeira está bem distribuída na matriz na amostra P3 com 30% de madeira, Figura 17, se observa as partículas de madeira dispersas na matriz círculo azul, e envoltas com polímero indicando que o agente de acoplamento foi eficiente. Também se observa que na amostra P1 (10%), Figura 15, ocorreu arrancamento da madeira da matriz seta amarela.

Figura 15 - MEV dos compostos, P1 10% de madeira, com aumento de 400 X.



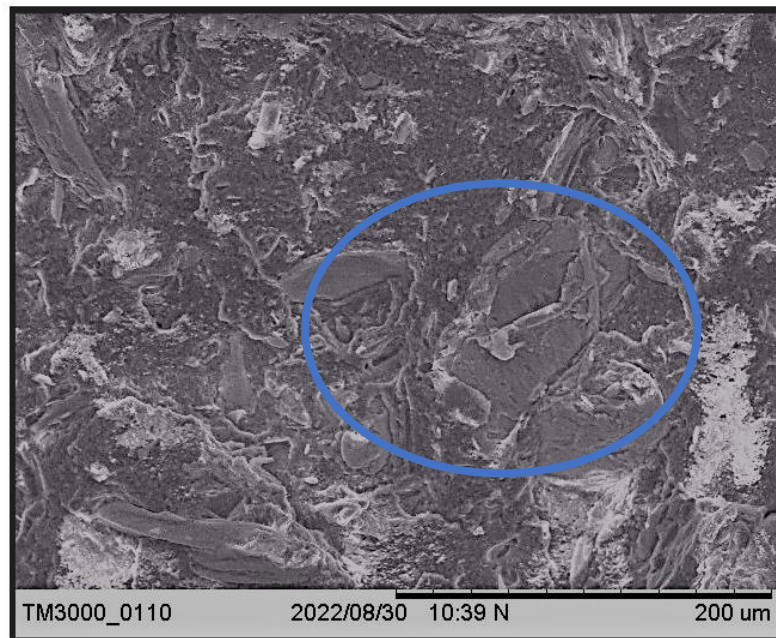
Fonte: O Autor (2024).

Figura 16 - MEV dos compostos, P2 20% de madeira, com aumento de 400 X.



Fonte: O Autor (2024).

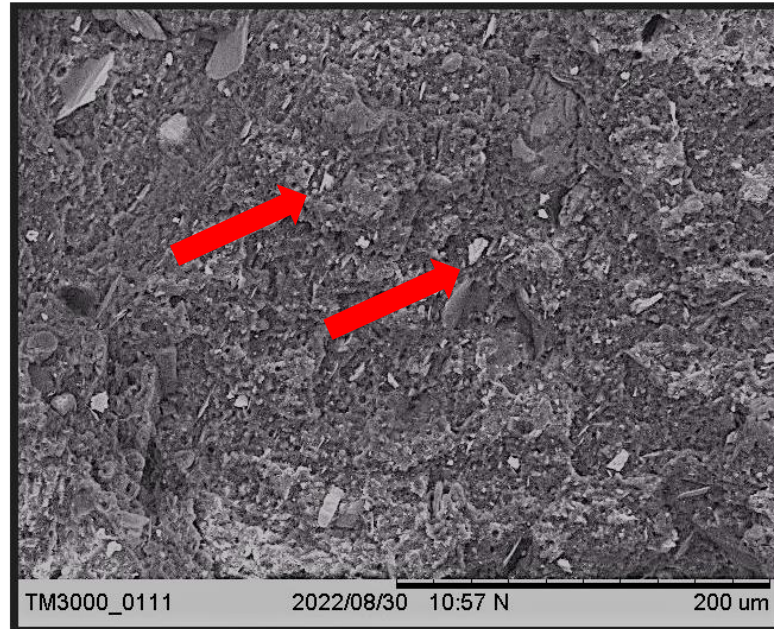
Figura 17 - MEV dos compostos, P3 30% de madeira, com aumento de 400 X



Fonte: O Autor (2024).

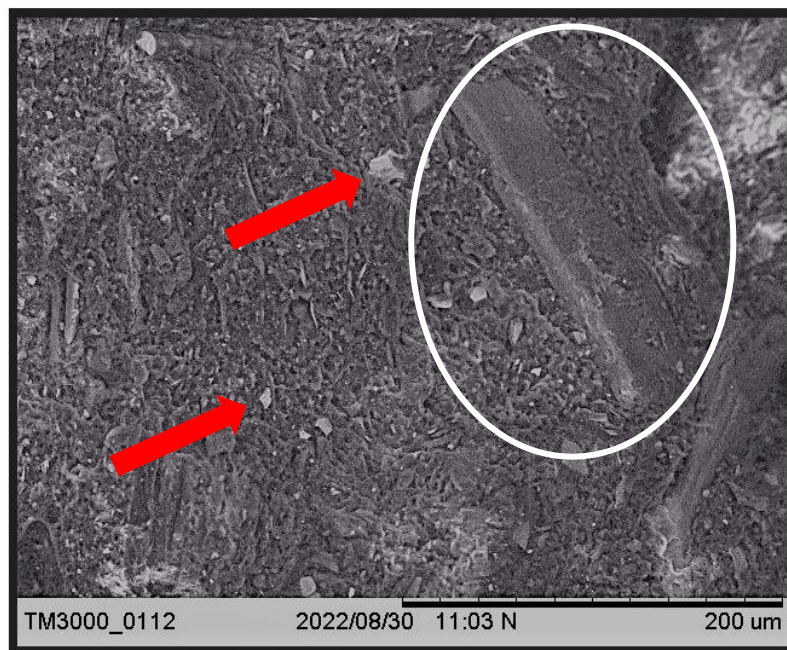
Nas Figuras 18 a 20, as amostras de Polipropileno Reciclado + Resíduo de Madeira são mostradas.

Figura 18 - MEV dos compostos, R1 10% de madeira, com aumento de 400 X.



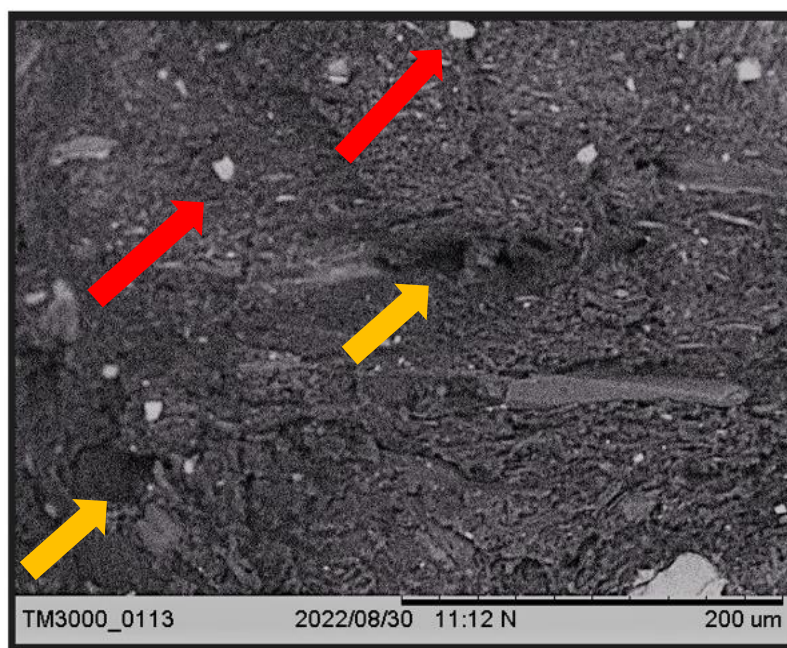
Fonte: O Autor (2024).

Figura 19 - MEV dos compostos, R2 20% de madeira, com aumento de 400 X.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 20 - MEV dos compostos, R2 20% de madeira, com aumento de 400 X.

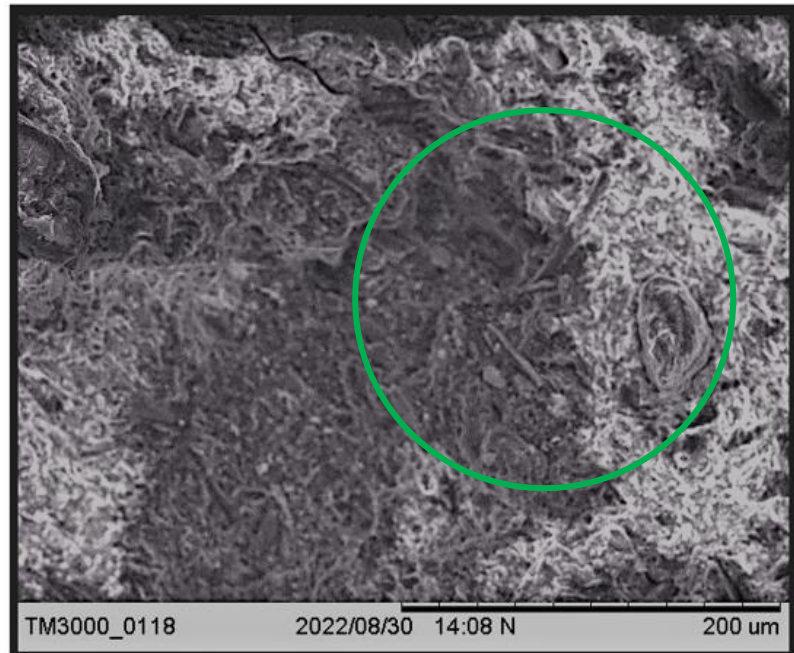


Fonte: O Autor (2024).

Em todas as amostras R1, R2 e R3 respectivamente com 10, 20 e 30% de madeira, observa-se uns pontos brancos, seta vermelha, que possivelmente sem contaminação do RP, pois não se observou esses pontos nas amostras P1, P2 e P3. Também observou-se que a superfície mostra uma boa dispersão das partículas de madeira, com a interface madeira/matriz adequada como pode ser visto na R2 círculo branco, na R3 se observa pontos de arrancamento da madeira da matriz que apresenta vazios, seta laranja.

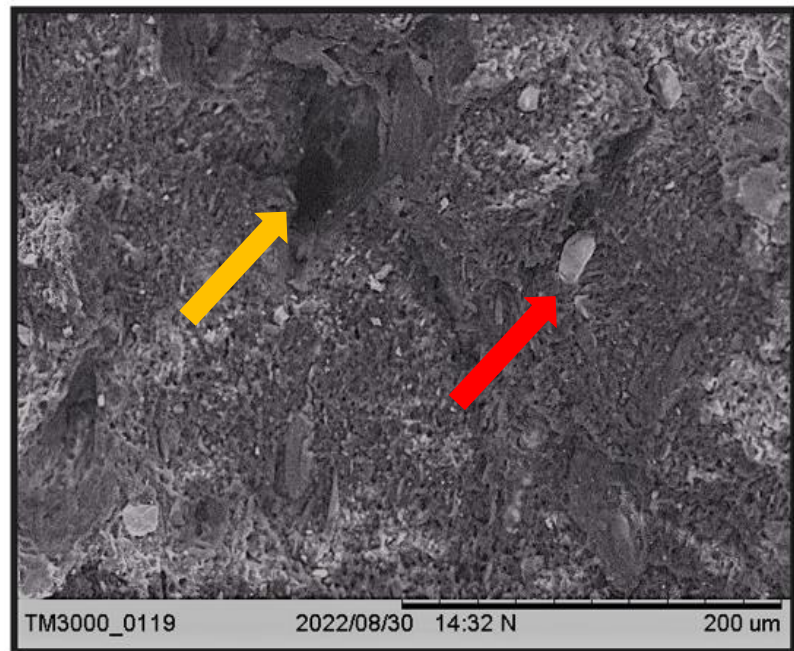
Com a adição de Versify, ao compósito, Figuras 21 a 23 observou-se uma nova configuração da matriz, possivelmente devido a interação entre o PP e o Versify o que é mais visível na RV1 quando comparado com P1 e R1 a amostra RV1 tem aspecto esponjoso, círculo verde, ainda se observa a presença de pontos brancos nas amostras, também se observa vazios referente arrancamento da madeira da matriz, seta laranja, a interface madeira/matriz tem um aspecto mais homogêneo e a madeira está mais envolta na matriz o que pode ser visto através da comparação entre RV3,P3 e R3,na amostra RV3 fica menos perceptível a presença da madeira, círculo vermelho.

Figura 21 - MEV dos compósitos, RV1 10% de madeira, com aumento de 400x.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 22 - MEV dos compósitos, RV2 20% de madeira, com aumento de 400x.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 23 - MEV dos compósitos, RV3 30% de madeira, com aumento de 400x.



Fonte: O Autor (2024).

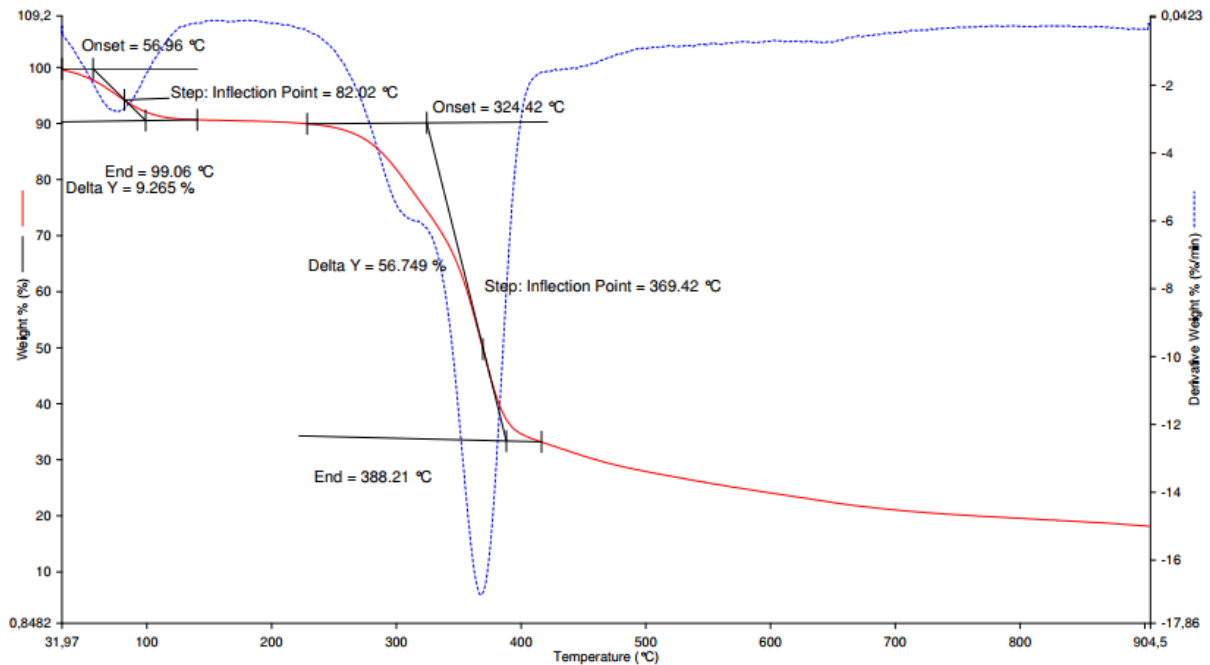
De modo geral a adição do anidrido maleico e do Versify promovem a adesão da madeira com a matriz polimérica o que segundo Bakar et al. (2010), os agentes compatibilizantes deixam a morfologia menos rugosa, diminuindo a presença de vazios e cavidades, que são resultantes do arrancamento da madeira da matriz. Battistelle et al (2014) e Oliveira e Mulinari (2014), também destaca a necessidade da utilização de agentes compatibilizantes quando se deseja obter compósito de polímero madeira.

4.3 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA

Na análise termogravimétrica (TGA), para serragem, Figura 24, mostra duas etapas de decomposição associadas à perda de massa em função da temperatura. A primeira etapa entre 56,96 a 99,06°C, resultando em uma perda de massa de 9,26%, essa fase é tipicamente associada à evaporação de água ou outros voláteis presentes na serragem, conforme Braz e Crnkovic (2013). A mais significativa inicia-se a 433,57°C, com a taxa máxima de decomposição a 466,43°C, e termina a 494,17°C, com uma perda de massa acumulada de 89,70%, indicando,

segundo Schulz et al. (2020), a degradação dos componentes orgânicos da madeira, parâmetros importantes, pois identificam o limite de degradação térmico da serragem.

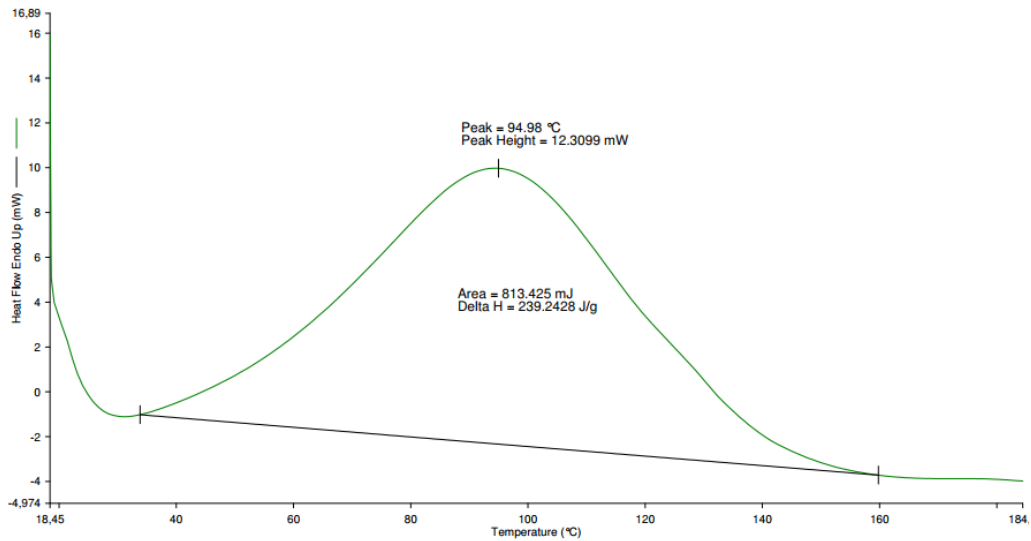
Figura 24 – Análise termogravimétrica da serragem.



Fonte: O Autor (2024).

A análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) da serragem, apresentada na Figura 25, indica que o principal evento térmico observado na serragem ocorre em torno de 94,98°C, o que é consistente com a evaporação da umidade contida na serragem de madeira, como observado por Braz e Crnkovic (2013). Essa transição endotérmica indica que o material possui uma quantidade significativa de umidade, cuja liberação requer uma absorção de calor substancial. Não foram observadas outras transições térmicas importantes até 200°C, sugerindo que, além da umidade, não há outras mudanças estruturais significativas no material nessa faixa de temperatura, evidenciando a necessidade de secagem da serragem antes do processamento do compósito, como observado na TGA.

Figura 25 - Análise DSC Serragem.

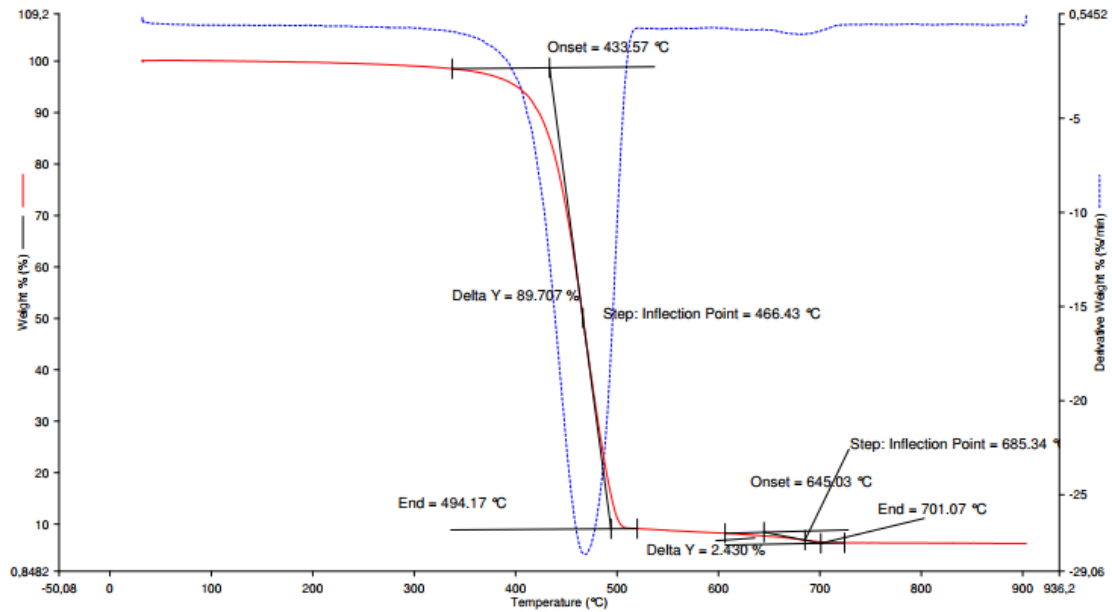


Fonte: O Autor (2024).

Desta forma, a serragem analisada é propícia ao uso na produção de madeira plástica, visto que Poletto (2017), recomenda materiais fibrosos naturais com temperaturas de fusão menores que 200°C para processos de produção de compósitos, uma vez que a maioria das fibras naturais se decompõe em temperaturas acima de 200°C. Entretanto a análise evidencia a necessidade de secagem da serragem antes do processamento do compósito, como observado na análise TGA.

A análise termogravimétrica (TGA) do plástico reciclado, representada na Figura 26, apresenta duas etapas de decomposição térmica associadas à perda de massa em função da temperatura. A primeira etapa tem início a 433,57°C, com a taxa máxima de decomposição ocorrendo a 466,43°C, ponto em que a maior parte da massa do material está sendo degradada. Essa fase se conclui a 494,17°C, com uma perda de massa acumulada de 89,70%, típico das poliolefinas (LAGO, 2022; MADI, 2013). A segunda etapa de decomposição começa a 645,03°C, com a taxa máxima a 685,34°C, e termina a 701,07°C, resultando em uma perda de massa adicional de 2,43%, indicando a degradação de resíduos menores, como impurezas ou compostos inorgânicos (GILL et al. 2022).

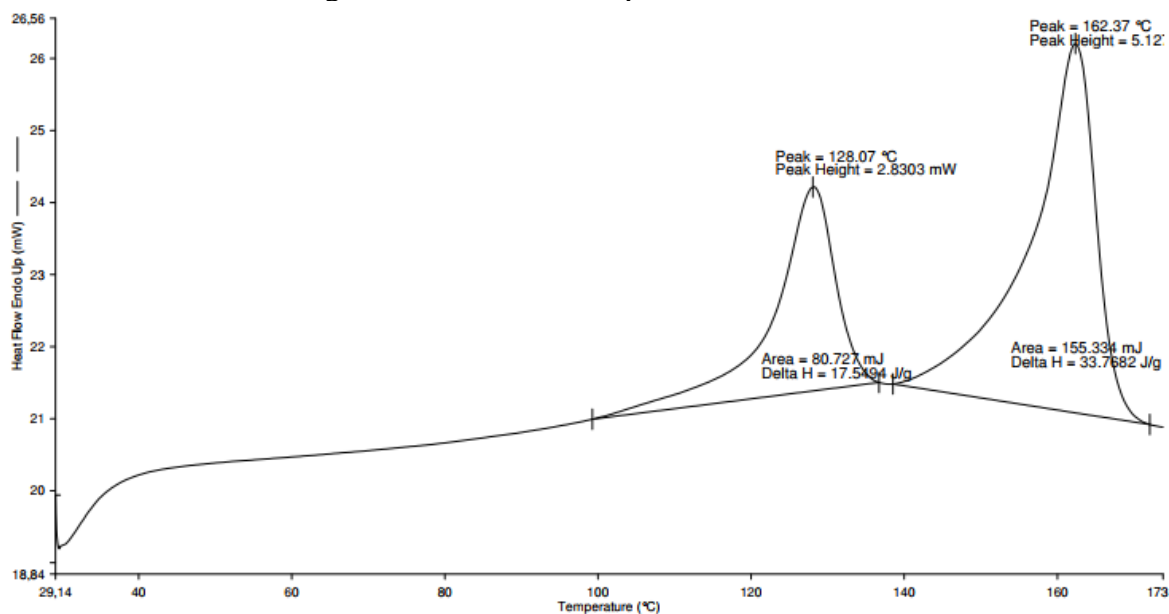
Figura 26 - Análise termogravimétrica plástico reciclado.



Fonte: O Autor (2024).

A análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) para o plástico reciclado, Figura 27, apresenta duas transições térmicas durante o aquecimento de 30°C a 200°C. O primeiro pico endotérmico ocorre a 128,07°C, com uma absorção de calor de 17,54J/g, sugerindo o início da fusão do polímero. O segundo pico, de fusão, mais significativo, ocorre a 162,37°C com uma absorção de calor de 33,7682 J/g. As duas transições de segunda ordem são típicas dos pontos de fusão de polietileno (PE) e polipropilenos (PP) conforme observados também por Lago (2022) e Madi (2013), ressaltam também que a mistura destes dois polímeros é comum em processos de reciclagem devido dificuldade de separar e identificar estes polímeros.

Figura 27 - Análise DSC plástico reciclado.



Fonte: O Autor (2024).

4.4 ANÁLISE ESPECTROMÉTRICA

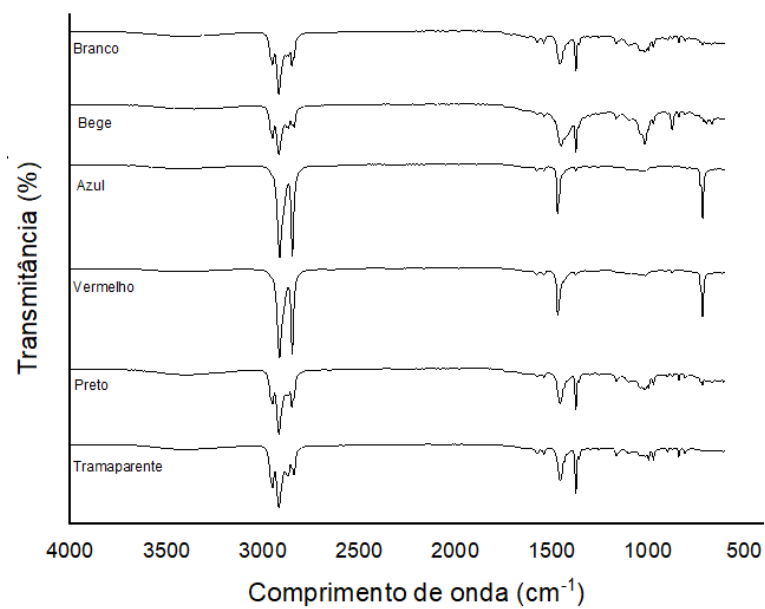
A análise de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier, segundo Hallmann (2023), possibilita a identificação de grupos funcionais e interações intermoleculares em materiais, contribuindo para a análise de materiais. Na análise visual dos constituintes dos resíduos plásticos, como apresentado na Figura 28, identificou-se 6 tipos de partículas, com base em diferentes colorações, sendo elas: branca, bege, azul, vermelha, preta e transparente. A análise espectroscópica das amostras é apresentada na Figura 29.

Figura 28 - Análise espectrométrica dos diferentes tipos de plásticos dos resíduos.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 29 - Análise espectrométrica dos diferentes tipos de plásticos dos resíduos.



Fonte: O Autor (2024).

Os espectros das amostras azuis e vermelhas são idênticas com picos característicos de polietileno nos comprimentos de onda de 1471 e 718 cm^{-1} picos estes encontrados também

por Fan e colaboradores (2021) e (AMORIN, 2018), estes pesquisadores também relatam que o polipropileno possui picos característicos na região de absorção de 950 a 11500 correspondem aos grupamentos CH_2 e CH_3 correspondente ao polipropileno, o mesmo relatado por Carceres e Canevarolo (2009) que observaram bandas de absorção características do polipropileno, sendo as bandas em 973 cm^{-1} e 1166 cm^{-1} correspondem aos estiramentos das ligações C–C, deformação angular do tipo rocking para o grupamento CH_3 e deformação angular C–H.

4.5 ANÁLISE TENSÃO X DEFORMAÇÃO

Os resultados de tensão deformação estão apresentados na Tabela 3, as amostras P1, P2 e P3 (mistura PP virgem e serragem), com teores de serragem de 10, 20 e 30 % respectivamente quando comparados com o PP virgem, apresentaram uma tendência de aumento da resistência a tensão na ruptura, módulo elástico e diminuição da elongação com o aumento do teor de serragem a adição de um aditivo compatibilizante contribuiu nos resultados obtidos, pois a serragem possui um caráter polar e o polipropileno apolar a adição do PP-Mga facilitou a interação da matriz com o reforço, os resultados obtidos neste trabalho foram semelhantes aos obtidos por Batistelle et. al. (2014). Já as amostras R1, R2 e R3 (mistura plástico reciclado e serragem) com 10, 20 e 30 % de serragem quando comparado com o RP apresentaram uma redução na tensão de ruptura, segundo Basalp et al (2020), quando são utilizados resíduos poliméricos pós consumo vários fatores podem estar associados a redução das propriedades mecânicas dos WPCs, pois os resíduos pós consumo são de fontes diferentes e a contaminação por outros polímeros podem ocorrer prejudicando as propriedades finais do compósito, mesmo com a adição de compatibilizantes.

As amostras RV1, RV2 e RV3 mostram uma elevação na resistência à tração, uma redução do módulo e aumento na deformação em relação as amostras R1, R2 e R3 as variações nos resultados, possivelmente ocorreu devido a adição do Versify, um modificador de impacto, que ajudou na adesão entre os resíduos de madeira e a matriz polimérica, segundo Voltz et al (2024), a adição de um elastômero melhoram a compatibilidade devido ao encapsulamento elastomérico das fibras de madeira, Oksman e Clemons (1997), destacam que onde as superfícies de partículas de madeira estão cobertas com elastômero melhoram a eficácia dos

modificadores de tenacidade para WPCs, reduzindo tanto a resistência quanto o módulo quando comparados a adição de um elastômero como uma fase macia no polímero da matriz.

Tabela 3 - Resultados da tração deformação para s diferentes amostras

CORPO DE PROVA	TENSÃO DE RUPTURA [MPa]	MOD. ELASTC. [Mpa]	DEF. ESPECÍF. RUPTURA [%]
PP	12,30 ± 2,26	243,50 ± 5,81	516,25 ± 182,60
P1	14,13 ± 1,49	262,90 ± 7,69	51,49 ± 20,34
P2	19,01±1,98	285,50 ± 22,35	21,30 ± 12,43
P3	20,20 ± 0,74	311,01 ± 18,93	15,43 ± 2,33
RP	22,36 ±4,44	248,30 ± 21,00	12,01 ± 1,78
R1	16,73 ± 1,57	325,50 ± 20,37	7,56 ± 0,81
R2	16,59 ± 0,44	263,30 ± 10,98	13,28 ± 2,11
R3	19,45 ± 2,30	383,30 ± 32,32	6,98 ± 1,55
RV1	18,22 ±1,84	287,90 ±30,37	9,43 ±0,89
RV2	19,83 ±0,20	305,90 ± 6,80	10,45 ±1,26
RV3	20,66 ± 0,73	340,60 ± 9,28	8,99 ± 1,02

Fonte: O Autor (2024).

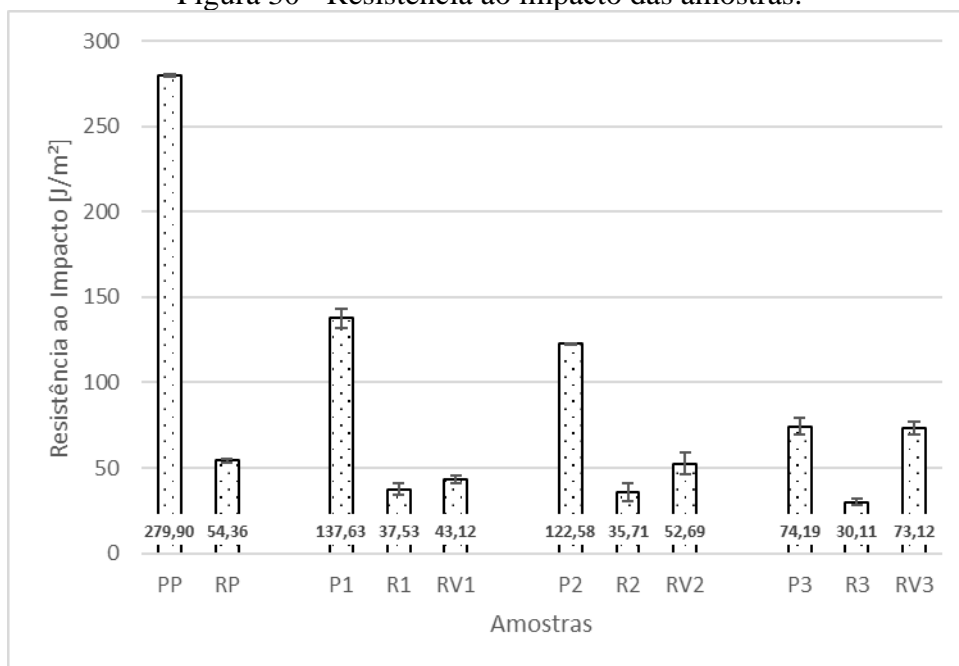
4.6 ANÁLISE RESISTÊNCIA AO IMPACTO

A resistência ao impacto é uma propriedade mecânica fundamental para avaliar o desempenho de materiais submetidos a forças dinâmicas, segundo Basboga et al. (2020), sendo um critério essencial em aplicações que exigem alta durabilidade e resistência a deformações. Os resultados desta análise permitem compreender como a combinação de plásticos reciclados, serragem e aditivos influenciam no comportamento do material diante de impactos, fornecendo parâmetros importantes sobre a viabilidade de produção do compósito. A resistência ao impacto das amostras produzidas, apresentada na Figura 29, e Tabela 5, percebe-se que:

O polipropileno virgem (PP) apresenta a maior resistência ao impacto, com 279,90J/m², devido à sua homogeneidade e ausência de interfaces fracas. Os plásticos reciclados (RP) mostram uma resistência significativamente menor, 54,36J/m², possivelmente conforme Ibrahim et al (2020), devido à mistura de materiais e possível degradação térmica. As amostras de PP com serragem (P1, P2, P3) apresentam redução progressiva na resistência ao impacto com o aumento da serragem, devido à fragilidade na interface madeira-polímero. O mesmo

padrão é observado nas amostras de plásticos reciclados com serragem (R1, R2, R3). Já as amostras de plástico reciclado com serragem e Versify (RV1, RV2, RV3) mostram aumento na resistência ao impacto, pois o Versify atua como modificador de impacto e agente de acoplamento, melhorando as propriedades do compósito (LOANG, 2022)

Figura 30 - Resistência ao impacto das amostras.



Fonte: O autor (2024).

Tabela 4 - Resistência ao Impacto das amostras analisadas.

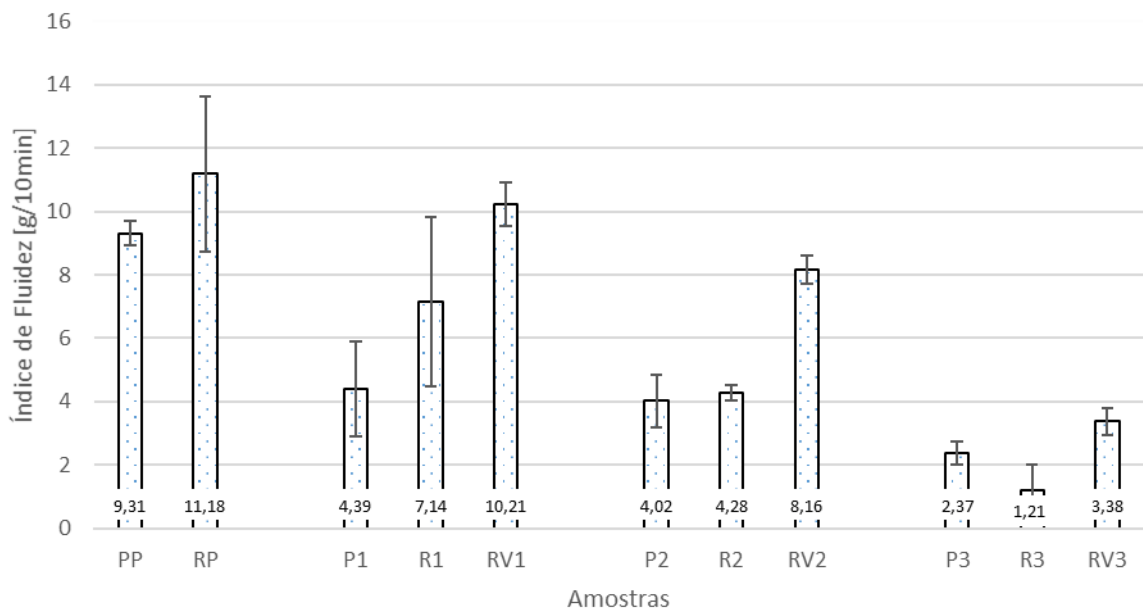
Amostra	Resistência Média [J/m²]	Desvio Padrão [%]
PP	279,90	0,73
RP	54,36	1,13
P1	122,58	0,26
P2	137,63	5,77
P3	74,19	4,93
R1	37,53	3,54
R2	35,71	5,14
R3	30,11	1,86
RV1	43,12	2,07
RV2	52,69	6,46
RV3	73,12	3,72

Fonte: O Autor (2024).

4.7 ANÁLISE ÍNDICE DE FLUIDEZ

A avaliação da fluidez é um fator crucial para compreender o comportamento dos materiais durante o processo de extrusão, etapa essencial na fabricação desses compósitos. Na análise de Ewum et al (2022), a fluidez influencia diretamente a eficiência do processo produtivo, bem como as propriedades finais do material, como resistência mecânica e estabilidade dimensional. Os resultados obtidos fornecem uma visão sobre a capacidade de processamento dos polímeros reciclados e da serragem, permitindo a identificação de condições para a produção de compósitos com melhor desempenho e qualidade, a análise do índice de fluidez apresentada na Figura 30 e Tabela 6.

Figura 31 - Análise do índice de fluidez dos compósitos.



Fonte: Os Autores (2023).

Os resultado de índice de fluidez dos compósitos P1, P2, P3, R1, R2, R3, RV1, RV2 e RV3 mostram uma tendencia a redução do índice de fluidez com o aumento do percentual de serragem , possivelmente atribuído à adição da serragem, que por ser sólida na temperatura de processamento , dificulta o fluxo do polímero fundido, segundo Batistelle et al (2014) e Scheeren et al (2020), o índice de fluidez diminui proporcional com o aumento da adição da

madeira, devido as características físicas do reforço ser sólido durante o processamento dificultando o deslocamento das cadeias poliméricas. Já a adição do Versify no RP aumentou a fluidez de RV1, RV2 e RV3 quando comparados com R1, R2 e R3, em todas as proporções estudadas, possivelmente devido a menor temperatura de fusão do Versify em comparação PR o que pode ter influenciado no fluxo do fundido. Segundo Bakar et al. (2010), normalmente quando ocorre aumento do índice de fluidez, se deve a melhor movimento molecular das cadeias poliméricas, neste estudo as cadeias poliméricas do modificador de impacto (Versify) podem ter a ação de lubrificante/plastificante induzindo ao amento da fluidez.

Tabela 5 - Resultados do índice de fluidez das amostras.

Amostra	Índice de Fluidez Médio [g/10min]	Desvio Padrão [%]	Amostra	Índice de Fluidez Médio [g/10min]	Desvio Padrão [%]
PP	9,31	0,37	P1	4,39	1,51
RP	54,36	1,13	P2	4,02	0,82
			P3	2,37	0,38
R1	7,14	2,67	RV1	10,21	0,69
R2	4,28	0,25	RV2	8,16	0,46
R3	1,21	0,79	RV3	3,38	0,43

Fonte: O Autor (2024).

5 CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido aborda uma importante contribuição ao estudo de compósitos de madeira plástica, evidenciando o potencial da utilização de resíduos poliméricos e serragem de madeira na fabricação de novos materiais com boas propriedades mecânicas. No entanto, a pesquisa também destaca alguns desafios críticos, principalmente relacionados à qualidade dos resíduos utilizados, que podem influenciar diretamente no desempenho final dos compósitos. A análise mostrou que as contaminações presentes nos polímeros reciclados podem prejudicar a uniformidade e a resistência dos materiais produzidos, indicando a necessidade de processos rigorosos de triagem e limpeza dos resíduos antes de sua incorporação no processo de produção.

Os resultados obtidos indicam que, apesar dos desafios enfrentados, os compósitos de madeira plástica alcançaram propriedades de resistência à tração comparáveis a algumas classes de madeiras naturais, variando entre 14 MPa e 21 MPa, o que demonstra a viabilidade de sua aplicação em substituição a materiais convencionais, principalmente em setores que demandam materiais com boas propriedades mecânicas e durabilidade. A adição do aditivo Versify mostrou-se particularmente eficaz, não apenas melhorando a compatibilidade entre os resíduos de madeira e a matriz polimérica, mas também aumentando a resistência ao impacto e a fluidez do material. Isso sugere que o uso de modificadores de impacto e agentes compatibilizantes pode ser uma solução viável para superar as limitações associadas ao uso de materiais reciclados.

Em termos de sustentabilidade, a produção de compósitos a partir de resíduos pós-consumo de plásticos e serragem de madeira não apenas oferece uma solução para o problema do descarte inadequado desses materiais, mas também contribui significativamente para a economia circular. Ao promover a reutilização de resíduos que seriam descartados, o processo minimiza a extração de recursos naturais e reduz a quantidade de resíduos destinados a aterros. Esse aspecto é fundamental em um contexto global de crescente preocupação com a preservação ambiental e o desenvolvimento de soluções mais ecológicas.

Contudo, é importante destacar que, para garantir a qualidade e consistência do produto final, os processos de fabricação e a seleção dos materiais necessitam de uma análise criteriosa. A contaminação dos polímeros reciclados e a variação nas propriedades dos resíduos de madeira utilizados representam desafios que precisam ser enfrentados através da melhoria dos processos de reciclagem e de técnicas de purificação dos materiais. Testes adicionais,

incluindo análises térmicas e de durabilidade, serão essenciais para garantir que os compósitos atendam às exigências de diferentes aplicações, particularmente em ambientes mais severos, como o da construção civil.

As análises realizadas demonstraram que a incorporação de resíduos de madeira influencia significativamente as propriedades mecânicas dos compósitos. No entanto, a variabilidade dos resultados sugere que a composição e o processamento dos materiais precisam ser otimizados para garantir um desempenho consistente. A adição de agentes compatibilizantes, como o anidrido maleico e o Versify, demonstrou ser uma estratégia eficaz para melhorar a coesão entre a matriz polimérica e os resíduos de madeira, reduzindo a presença de vazios e melhorando a distribuição das partículas no compósito.

REFERÊNCIAS

ABDI – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **Modelos de negócios para aprimoramento da gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. ABDI, Brasília, 2021.

ABIPLAST – **Associação Brasileira da Indústria do Plástico. Banco de Resíduos Plásticos**. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/banco-de-residuos/>. Acesso em: 15 set 2024.

AMORIM, Laudenor. **Avaliação de compósitos de polipropileno virgem e polietileno reciclado reforçados com fibras de sisal para aplicações em peças automotivas**. Dissertação (Engenharia e Ciência de Materiais) Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2018.

ALMEIDA, Aquiles Bezerra. **Madeira plástica: estudo de viabilidade técnico e econômico a partir do resíduo sólido**. Dissertação (Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ALMEIDA, Priscila de Oliveira. **Compósito de madeira plástica reforçada com mica muscovita**. Dissertação (Ciência e Tecnologia de Materiais) Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2018.

ALVES, Arthur Felipe Matias. **Compósito híbrido PET reciclado/rejeito de fibras de algodão/argila montmorilonita para aplicações em têxteis técnicos**. Dissertação (Engenharia Têxtil) Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2022.

ALVES, Patrícia Siqueira; BECKER, Danieli; JESUS, Anelise de; KIECKOW, Flávio. **Estudo e caracterização do compósito de plástico reciclado e resíduo de MDF**. Revista *Vivências*, v. 18, n. 37, p. 337-352, 2022. DOI: <https://doi.org/10.31512/vivencias.v18i37.679>.

ASHORI, Alireza; AYRILMIS, Nadir; HEYDARI, Vahid. **Enhancing interfacial adhesion through coupling agent incorporation in plywood/plastic waste composite materials**. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 127, p. 103513, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103513>.

BAKAR, MB Abu et al. **Flammability and mechanical properties of wood flour-filled polypropylene composites**. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 116, n. 5, p. 2714-2722, 2010. <https://www.researchgate.net/publication/227774839>.

BASBOĞA, İbrahim Halil; ATAR, İlkey; KARAKUŞ, Kadir; MENGELOĞLU, Fatih. **Determination of Some Technological Properties of Injection Molded Pulverized-HDPE Based Composites Reinforced with Micronized Waste Tire Powder and Red Pine Wood Wastes**. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 28, n. 6, p. 1776-1794, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01726-7>.

BASALP, Dildare et al. Utilization of municipal plastic and wood waste in industrial manufacturing of wood plastic composites. *Waste and Biomass Valorization*, v. 11, p. 5419-5430, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00986-7>.

BATTISTELLE, Rosane; VIOLA, Natalia; BEZERRA, Barbará; VALARELLI, Ivaldo. **Caracterização física e mecânica de compósito de polipropileno reciclado e farinha de madeira sem aditivos**. *Revista Matéria*, v.19, n.01, pp. 07-15, 2014.

BRANDT, Christopher W.; FRIDLEY, Kenneth J. **Effect of load rate on flexural properties of wood-plastic composites**. *Wood and Fiber Science*, v. 35, n. 1, p. 115-147, 2001.

BRAZ, Carlos Eduardo Mendes; CRNKOVIC, Paula Cristina Garcia Manoel. **Caracterização térmica e espectroscópica de materiais lignocelulósicos**. In: Congresso Brasileiro de Polímeros (CBPol), 12., 2013, Campos do Jordão. Anais [...]. São Paulo: Associação Brasileira de Polímeros, 2013.

BRITO, Hroldo Lacerda; BERNARDES, Henrique; NASCIMENTO, Natália Stephane Oliveira; MOREIRA, Paloma dos Santos. **Análise sobre utilização da madeira plástica: Aplicação dos princípios do modelo de economia circular**. V Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN), Fundação Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, 2021.

CALLISTER, William. D.; RETHWISCH, David. G. **Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução**. 9. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CÁCERES, Carlos A.; CANEVAROLO, Sebastião V. **Degradação do polipropileno durante a extrusão e a geração de compostos orgânicos voláteis**. *Polímeros*, v. 19, p. 79-84, 2009.

CARNIETTO, Mirela Bertin. **Análise de Mercado de Wood-Plastic Composite (WPC) no Brasil**. Dissertação (Agronomia) Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2020.

CASTRO, Vinicius Gomes.; GUIMARÃES, Pompeu Paes. **Deterioração e Preservação da Madeira**. Edifusa. Mossoró, 2018.

COSTA, Felipe Maxwell Farias. **Madeira plástica reciclável e ecologicamente correta: análise da inflamabilidade e resistência**. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2018, Maceió. Anais [...]. Maceió: CONTECC, 2018.

D'AGUIAR, Savanna Cristina Medeiros. **Estabilidade de colunas de material compósito reforçado por fibras**. Dissertação (Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

ELSHEIKH, Ammar H.; PANCHAL, Hitesh; SHANMUGAN, S.; MUTHURAMALINGAM, T.; EL-KASSAS, Ahmed M.; RAMESH, B. **Recent progresses in wood-plastic composites: Pre-processing treatments, manufacturing techniques, recyclability and eco-friendly assessment**. *Cleaner Engineering and Technology*, v. 8, p. 100450, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100450>.

EWURUM, Lucky I.; JOKIC, Daniel; BAR-ZIV, Ezra; McDONALD, Armando G. **Evaluation of the Rheological and Mechanical Properties of Mixed Plastic Waste-Based Composites**. *Waste and Biomass Valorization*, v. 13, n. 4, p. 4625-4637, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01794-x>.

FAN, Chihhao et al. Microplastic constituent identification from admixtures by Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy: The use of polyethylene terephthalate (PET), polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyvinyl chloride (PVC) and nylon (NY) as the model constituents. **Environmental Technology & Innovation**, v. 23, p. 101798, 2021.

FENG, Yanhong; YUAN, Zixin; SUN, Hang; HE, Hezhi; ZHANG, Guizhen. **Toughening and reinforcing wood flour/polypropylene composites with high molecular weight polyethylene under elongation flow.** *Composites Science and Technology*, v. 200, p. 108395, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108395>.

FERREIRA, Alice de Cassia. **Reutilização e reciclagem de plásticos.** Belo Horizonte: Instituto Centro de Capacitação e Apoio ao Empreendedor, 2020

FLETES, Roberto Carlos Vázquez; LÓPEZ, Erick Omar Cisneros; SÁNCHEZ, Francisco Javier Moscoso; MENDIZÁBAL, Eduardo; NÚÑEZ, Rubén González; RODRIGUE, Denis; ORTEGA, Pedro. **Morphological and Mechanical Properties of Bilayers Wood-Plastic Composites and Foams Obtained by Rotational Molding.** *Polymers*, v. 12, n. 3, p. 503, 2020. DOI:10.3390/polym12030503.

FORNARI FILHO, Celso Carlino Maria. **Fibras Vegetais para Compósitos Poliméricos.** UESC, Ilhéus, 2017.

GENTIL JUNIOR, Geraldo Ari. **Obtenção de placas à base de PVC reciclado para uso em construção civil.** Dissertação (Ciência e Tecnologia Ambiental) Universidade do Sagrado Coração, Bauru, 2019.

GILL, Yasir Qayyum; ABID, Umer; IRFAN, Muhammad Shafiq; SAEED, Farhan; SHAKOOR, Abdul; FIRDAUS, Ateeqah. **Fabrication, characterization, and machining of polypropylene wood flour composites.** *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 47, n. 6, p. 5973-5983, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05768-4>.

GONÇALVES, Alice Souza; GERARDO, Camila Ferreira; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BASTOS, Daniele Cruz; SANTOS, Shirleny Fontes. **Compósito de Madeira Plástica / Carga Inorgânica: Influência do Tipo de Carga.** *Revista Univap. São José dos Campos*, v. 26, n.51, p. 108-119, 2019.

GUIMARÃES, Luiz Felipe Cerceau. **Avaliação dos aspectos técnicos e econômicos na produção de madeira plástica por meio da utilização de materiais reciclados.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

HALLMANN, Lucas Miguel. **Análise de tensofissuramento em frascos soprados de polietileno de alta densidade para a indústria de domissanitários via data visualization**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

IBRAHIM, Mohamed A.; HIRAYAMA, T.; KHALAFALLAH, Diab. **An Investigation into the Tribological Properties of Wood Flour Reinforced Polypropylene Composites**. *Materials Research Express*, v. 7, n. 1, p. 015313, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab600c>.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Chave de identificação de madeiras comerciais**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, 2021.

KIELING, Antonio Claudio; SANTANA, Genilson Pereira; SANTOS, Maria Cristina dos.

Compósito de madeira plástica: Considerações gerais. *Scientia Amazonia*, Revista online, v.8, n. 1, B1-B14, 2019.

LAGO, Guilherme Leite. **Avaliação da qualidade do polipropileno pós-consumo provenientes de empresas de reciclagem**. Dissertação (Engenharia de Minas Metalúrgica e de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2022.

LOAN, Doan Thi Thu. **An Investigation on Improving the Impact Strength of Polypropylene**. *Journal of Science and Technology - University of Danang*, 20(4), 58-62.

LOPES, Shara Carvalho; CARMO, Murilo Elias Rosa do; SERRA, Sheyla Mara Baptista. **Levantamento de soluções construtivas em madeira industrializada**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 12., 2021, Maceió. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2021.

MADI, N. K. **Thermal and mechanical properties of injection molded recycled high density polyethylene blends with virgin isotactic polypropylene**. *Materials & Design*, v. 46, p. 435-441, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.004>.

MARTINS, G.; ANTUNES, F.; MATEUS, A.; MALÇA, C. **Optimization of a wood plastic composite for architectural applications**. *Procedia Manufacturing*, v. 12, p. 203-220, 2017. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.08.025.

MATTOS, Cezar. de; FRANCISQUETTI, Edson. L. Review: Compósitos poliméricos para substituir madeira aplicada em semirreboques - fatores que influenciam no comportamento mecânico. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v.19, n. 32, p. 135-240, 2018. DOI:10.31514/rliberato.2018v19n32.p169.

MAZUMDAR, Sanjay K. **Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering**. Boca Raton: CRC Press, 2002. 416 p. ISBN 0-8493-0585-3.

MEJJAD, Nezha; LAISSAOUI, Abdelmourhit; AIT BOUH, Hasna; EL AOUIDI, Samira; MOUMEN, Aniss; AZIDANE, Hind; EL BOUHADDIOUI, Mohamed. **Analytical review of microplastics occurrence in bottled water, tap water, and wastewater treatment plants**. *E3S Web of Conferences*, v. 489, p. 06005, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448906005>.

MELO, Luiz Flávio Luciano de. **Madeira plástica de carnaúba (Copernícia prunifera), produzida com resinas de polipropileno e polietileno – processo, produto e características**. Tese (Engenharia e Ciência de Materiais) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

MIRANDA, Luana Varela. **Compósito à base de polipropileno reciclado para utilização nas construções rural e civil**. Dissertação (Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

MONTANÉS, N.; QUILES-CARRILLO, L.; FERRANDIZ, S.; FENOLLAR, O.; BORONAT, T. **Effects of Lignocellulosic Fillers from Waste Thyme on Melt Flow Behavior and Processability of Wood Plastic Composites (WPC) with Biobased Poly(ethylene) by Injection Molding**. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 27, n. 3, p. 747-756, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01388-0>.

NAZÁRIO, Gabriel Fernando; SILVA, Vitor Crescencio da; ROCHA, Anderson H. S.; RODRIGUES, Felipe Reis; LIMA, Fernando Parra dos Anjos. **Madeira plástica: uma revisão conceitual**. *Revista Engenharia em Ação UniToledo*, v. 1, n. 1, p. 54-71, out./dez. 2016.

OKSMAN, Kristiina; CLEMONS, Craig. **Mechanical properties and morphology of impact modified polypropylene–wood flour composites**. *Journal of applied polymer science*, v. 67, n. 9, p. 1503-1513, 1998.

OLIVEIRA, Helinngton Nunes; MULINARI, Daniela Regina. Avaliação do uso de agente compatibilizante em compósitos poliméricos. **Cadernos UniFOA**. 2014.

PATTI, Antonella; CICALA, Gianluca; ACIERNO, Stefano. **Rotational Rheology of Wood Flour Composites Based on Recycled Polyethylene**. *Polymers*, v. 13, n. 14, p. 2226, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13142226>.

POLETTO, Matheus. Compósitos termoplásticos com madeira - uma breve revisão. **Revista Interdisciplinar de Ciência Aplicada**. Bento Gonçalves, v.2, n. 4, p. 42-48,2017.

POKHREL, Geeta; GARDNER, Douglas J.; HAN, Yousoo. **Properties of wood–plastic composites manufactured from two different wood feedstocks: wood flour and wood pellets**. *Polymers*, v. 13, n. 2769, p. 1-19, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162769>.

ROSSINO, L.S.; OLIVEIRA, R.C; FERREIRA, R. MORETO, J.M.; MANFRIATO, M.D; PAIVA, J.M.F. **Estudo comparativo da resistência à flexão da madeira plástica, fibra de madeira de densidade média, pinus e polipropileno submetidos aos condicionamentos de secagem, saturação de umidade e radiação UV**. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 14, n. 1 11-18, 2019.

SANADI, Anand Ramesh; GUNA, Vijaykumar; HOYSAL, Raksha V.; KRISHNA, Ashwini; DEEPIKA, S.; MOHAN, C. B.; REDDY, Narendra. **MAPP Compatibilized Recycled Woodchips Reinforced Polypropylene Composites with Exceptionally High Strength and Stability**. *Waste and Biomass Valorization*, v. 14, p. 1267–1279, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02150-3>.

SANTOS, Maria Cristina dos; SANTANA, Genilson Pereira; KIELING, Antonio Claudio. **Compósitos de madeira plástica: considerações gerais**. *Scientia Amazonia*, v. 8, n. 1, p. B1-B14, 2019.

SBRT - SERVIÇO BRASILEIRO DE RESPOSTAS TÉCNICAS. **Madeira Plástica. Dossiê Técnico informações técnicas sobre a fabricação e o uso de madeira plástica.** IEL, 2013.

SCHEEREN, Denise; MAHLMANN, Mendes; MULLER, Francielli. Avaliação das propriedades de um compósito de matriz polimérica de polipropileno reciclado reforçado com resíduo de madeira. **Tecno-Lógica**, v. 24, n. 2, p. 132-141, 2020.

SCHULZ, Henrique Römer; ACOSTA, Andrey Pereira; GALLIO, Ezequiel; BARBOSA, Kelvin Techera; GATTO, Darci Alberto. **Avaliação de propriedades termoquímicas e físico-mecânicas de três espécies florestais de rápido crescimento.** Revista Matéria, v. 25, n. 3, 2020. DOI: 10.1590/S1517-707620200003.1118.

SEO, Jihyeon; KIM, Hyunjin; JEON, Sugyeong; VALIZADEH, Soheil; KHANI, Yasin; JEON, Byong-Hun; RHEE, Gwang Hoon; CHEN, Wei-Hsin; LAM, Shiung; KHAN, Moonis Ali; PARK, Young-Kwon. **Thermocatalytic Conversion of Wood-Plastic Composite Over HZSM-5 Catalysts.** *Bioresource Technology*, v. 373, p. 128702, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128702>.

SILVA, William Cesar Livramento. **Influência das condições de processamento nas propriedades de madeira plástica com pó de casca de castanha de caju (CCC).** Dissertação (Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2019.

VÄNTSI, Olli. **Utilization of recycled mineral wool as filler in wood plastic composites.** Tese (Ciência e Tecnologia) Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, 2015.

VÖLTZ, Luísa Rosenstock; BERGLUND, Linn; OKSMAN, Kristiina. Use of Recycled Additive Materials to Promote Efficient Use of Resources While Acting as an Effective Toughness Modifier of Wood–Polymer Composites. **Polymers**, v. 16, n. 18, p. 2549, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16182549>.

YAMAJI, Fabio Minoru. **Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira.** Tese (Ciências Florestais) Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.