

**Universidade Federal de Ouro Preto**

Escola de Minas

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

PROPEC

---

Dissertação

---

**Avaliação da aplicabilidade  
de resíduos pandêmicos na  
produção de Compósitos  
Madeira-Plástico**

*Anderson Ravik dos Santos*

Ouro Preto  
2022



**UFOP**

Anderson Ravik dos Santos

Avaliação da aplicabilidade de resíduos pandêmicos na produção de  
Compósitos Madeira-Plástico

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Data da aprovação: 25/07/2022

Área de concentração: Materiais e Construção

Linha de Pesquisa: Materiais e Componentes da Construção

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Wanna Carvalho Fontes – UFOP

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Patrícia Santiago de Oliveira Patrício – CEFET MG

Ouro Preto

2022

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D722a dos Santos, Anderson Ravik.  
Avaliação da aplicabilidade de resíduos pandêmicos na produção de  
Compósitos Madeira-Plástico. [manuscrito] / Anderson Ravik dos Santos. -  
2022.

91 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Wanna Carvalho Fontes.

Coorientadora: Profa. Dra. Patrícia Santiago de Oliveira Patrício.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro  
Preto. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas e Construção.

1. Materiais compostos - Compósito Madeira-Plástico. 2.  
Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 3. Material de Construção -  
Sustentabilidade. 4. Papelão - Papelão Ondulado. 5. Máscaras - Máscaras  
de TNT. 6. Polipropileno. I. Fontes, Wanna Carvalho. II. Patrício, Patrícia  
Santiago de Oliveira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624.01

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA URBANA



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Anderson Ravik dos Santos**

### **Avaliação da aplicabilidade de resíduos pandêmicos na produção de Compósitos Madeira-Plástico**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 25 de julho de 2022

#### Membros da banca

Dra. Wanna Carvalho Fontes - Orientadora, Universidade Federal de Ouro Preto  
Dra. Patrícia Santiago de Oliveira Patrício - Co-orientadora, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
Dra. Eliane Ayres - Universidade do Estado de Minas Gerais  
Dr. José Maria Franco de Carvalho - Universidade Federal de Viçosa

Wanna Carvalho Fontes, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 27 de julho de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Wanna Carvalho Fontes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/07/2022, às 11:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0368394** e o código CRC **DCA30324**.

*Dedico este trabalho aos meus pais  
que sempre acreditaram no poder transformador da educação.*

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e do aprendizado. À minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dra. Wanna Fontes, e à minha coorientadora, Prof<sup>a</sup>. Dra. Patrícia Patrício, por todos os direcionamentos, esclarecimentos e conhecimentos compartilhados. Aos professores da banca examinadora de qualificação e dissertação pelas recomendações. À Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PROPEC) pela oportunidade de cursar o Mestrado; à Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (PROPI), por meio do Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP), pelo auxílio financeiro destinado à mobilidade necessária a realização deste trabalho. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo aporte financeiro. Ao Laboratório Intechlab, vinculado ao Programa de Pós-graduação e Departamento de Química (DEQUI) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG); e ao Laboratório de Microscopia Eletrônica – NanoLab, vinculado à REDEMAT, pelas infraestruturas cedidas, sem as quais este trabalho não poderia ter sido realizado. Aos meus amigos pós-graduandos do CEFET, Jhonatan Bispo, Ingrid Amélia, Ítalo Coura, Fabiane Lopes, Gabriel Silveira, Henrique Giacomio e Jefferson Samuel, que compartilharam comigo não somente o espaço do Intechlab, como também seu conhecimento e experiência. Em especial ao meu amigo Venilton Menezes, com seu espírito altruísta, sempre disposto a ajudar ao próximo. Aos meus amigos e coorientandos de Projetos de Iniciação Científica, Tiago Vieira e Guilherme Dantas, pelo auxílio nos procedimentos experimentais, revisões bibliográficas e todo apoio durante o mestrado. Aos colegas que colaboraram no processo de revisão do texto ou procedimentos experimentais, em especial à Mariana Vieira e Fernanda Elói. Aos meus grandes amigos do Mestrado da UFOP, Victor Carvalho, Douglas Rezende, Romário Parreira, Luciana Webá e Bianca Leão, pelo apoio incondicional até aqui. Ao meu querido amigo Pedro Paulo Ribeiro pelo carinho que sempre me recebeu em Belo Horizonte. E por fim, aos meus pais, Irael dos Santos e Helane Aparecida, meus irmãos Prudêncio Rennys, Iago Roberto e Alécia Dardiele e muito especialmente à minha namorada, Ana Carolina dos Santos Antônio, pelo incentivo e força de sempre, sendo luz no meu caminho.

## Resumo

A pandemia de Covid-19 proporcionou um aumento na geração de resíduos, em especial de papelão ondulado e de máscaras de proteção individual fabricadas com Tecido Não Tecido (TNT), cuja principal matéria-prima é o Polipropileno (PP). Nesse contexto, o presente trabalho verificou a aplicabilidade do PP, proveniente de máscaras de TNT descartadas, e de resíduos de papelão ondulado na produção de Compósitos Madeira-Plástico (CMP), como matriz polimérica e carga de enchimento, respectivamente. Foi realizada uma revisão sistemática abrangente acerca dos CMP, bem como três pesquisas experimentais envolvendo a produção de: I – uma blenda polimérica a partir de Polipropileno Virgem (PPv) e Polipropileno Reciclado (PPr); II – um compósito polimérico a partir de PPv e Papelão Ondulado reciclado (POr); e finalmente, III – CMP à base de PPv com a incorporação simultânea dos dois materiais pós-consumo (PPr e POr), submetidos a duas formas de processamento diferentes (extrusão e homogeneização termocinética). Os compósitos e blendas confeccionados foram rompidos em ensaios normatizados de tração e flexão e também submetidos a ensaios de absorção de água e inchamento. A pesquisa envolvendo CMP com ambos materiais residuais (III) ainda utilizou de imagens via Microscopia Eletrônica de Varredura e análise termogravimétrica. Os resultados evidenciam uma versatilidade dos CMP e blendas produzidos, tanto em composição, quanto em produção e desempenho. As faixas de temperatura utilizadas nos procedimentos foram validadas de forma que os materiais propostos podem ser aplicados sem risco de decomposição ou combustão. Nas pesquisas utilizando apenas um material residual, foi possível obter uma blenda com 50% de PPr com propriedades equivalentes à resina virgem, principalmente em relação a resistência à tração, e um compósito com 10% de POr que apresentou um equilíbrio entre melhores propriedades de rigidez e maior reaproveitamento de resíduos. Na pesquisa utilizando ambos materiais residuais (PPr e POr), o processo de homogeneização termocinética seguida por redução de partículas mostrou-se ineficiente, ocasionando o pior desempenho físico-mecânico. Em contrapartida, o compósito produzido via extrusão alcançou desempenho físico-mecânico superior aos demais compósitos de referência, incluindo uma amostra de CMP comercial. Desta forma, os CMP se mostraram uma promissora alternativa para a mitigação de impactos relacionados à poluição ambiental, destinação inadequada de resíduos e exploração de madeiras naturais, tornando os processos produtivos mais eficientes e ecológicos.

**Palavras-chaves:** Compósito Madeira-Plástico, Reaproveitamento de Resíduos, Material de Construção Sustentável, Papelão Ondulado, Máscaras de TNT, Polipropileno.

## Abstract

The Covid-19 pandemic has resulted in an increase in waste generation, especially corrugated cardboard and personal protective masks made of Non-Woven Fabric (NW), whose main raw material is Polypropylene (PP). In this context, the present work verified the applicability of PP, from discarded NW masks, and corrugated cardboard waste in the production of Wood-Plastic Composites (WPC), as a polymer matrix and filler, respectively. A comprehensive systematic review of WPC was carried out, as well as three experimental research involving the production of: I - a polymeric blend from Virgin Polypropylene (VPP) and Recycled Polypropylene (RPP); II - a polymeric composite from VPP and Recycled Corrugated Cardboard (RCC); and finally, III – VPP-based WPC with the simultaneous incorporation of the two post-consumer materials (RPP and RCC), submitted to two different processing forms (extrusion and thermokinetic homogenization). The composites and blends made were ruptured in a standardized tensile and bending test and also submitted to absorption and swelling tests. Research involving WPC with both residual materials (III) also used Scanning Electron Microscopy images and thermogravimetric analysis. The results show the versatility of the WPC and blends produced, both in composition, production and performance. The temperature ranges used in the procedures have been validated so that the proposed materials can be applied without risk of decomposition or combustion. In research using only one residual material, it was possible to obtain a blend with 50% RPP with properties equivalent to virgin resin, mainly in relation to tensile strength, and a composite with 10% RCC that presented a balance between better stiffness properties and greater reuse of waste. In the research using both residual materials (RPP and RCC), the thermokinetic homogenization process followed by particle reduction proved to be inefficient, causing the worst physical-mechanical performance. About that, the composite produced via extrusion achieved physical-mechanical performance superior to other reference composites, including a sample of commercial WPC. In this way, WPC proved to be a promising alternative to mitigate the impacts related to environmental pollution and inappropriate waste disposal, as well as to reduce the natural wood exploitation, making production processes more efficient and ecological.

**Keywords:** Wood-Plastic Composite, Waste Reuse, Sustainable Construction Material, Corrugated Cardboard, NWF Masks, Polypropylene.

## Sumário

1	CAPÍTULO 1 – Introdução.....	2
	1.1 Estrutura da dissertação.....	2
	1.2 Motivação, justificativa e originalidade.....	2
	1.3 Objetivo geral.....	4
	1.4 Objetivos específicos.....	4
	1.5 Plano de ação.....	5
	1.6 Referências Bibliográficas.....	6
2	Capítulo 2 – ASPECTOS E PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS MADEIRA- PLÁSTICO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA.....	8
	2.1 Introdução.....	9
	2.2 Metodologia.....	11
	2.3 Matriz Polimérica.....	12
	2.4 Carga.....	14
	2.5 Método de produção.....	17
	2.6 Agentes compatibilizantes.....	18
	2.7 Propriedades físicas e mecânicas.....	20
	2.8 Conclusão.....	24
	2.9 Referências Bibliográficas.....	25
3	Capítulo 3 – Estudo do efeito da adição de RESÍDUOS DE MÁSCARAS DE POLIPROPILENO nas propriedades FÍSICAS E MECÂNICAS DE blendas poliméricas.....	34
	3.1 Introdução.....	35
	3.2 Metodologia.....	37
	3.2.1 Matérias-primas e Procedimentos de moldagem das amostragens de controle e blendas.....	37
	3.2.2 Procedimentos de caracterização das amostragens de controle e blendas ...	39
	3.3 Resultados e Discussões.....	39
	3.3.1 Amostras de controle e de blendas poliméricas.....	39
	3.3.2 Caracterização físico-mecânica das amostragens de controle e blendas .....	40
	3.4 Conclusão.....	44

	3.5 Referências Bibliográficas.....	46
4	Capítulo 4 – APLICABILIDADE DE RESÍDUOS DE PAPELÃO ONDULADO COMO CARGA DE COMPÓSITOS MADEIRA-PLÁSTICO PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL .....	49
	4.1 Introdução.....	50
	4.2 Metodologia.....	51
	4.2.1 Matérias-primas e procedimentos de moldagem dos CMP.....	51
	4.2.2 Processos de caracterização dos CMP .....	53
	4.3 Resultados e Discussões .....	54
	4.3.1 Materiais e Compósitos Madeira-Plástico .....	54
	4.3.2 Caracterização físico-mecânica das amostragens de controle e compósitos.....	55
	4.3.3 Absorção e inchamento .....	60
	4.4 Conclusão .....	61
	4.5 Referências Bibliográficas.....	62
5	Capítulo 5 – PROPOSIÇÃO DE COMPÓSITOS MADEIRA-PLÁSTICO PRODUZIDOS A PARTIR DE POLIPROPILENO VIRGEM E RESÍDUOS DA PANDEMIA DE COVID-19 .....	66
	5.1 Introdução.....	67
	5.2 Materiais e Métodos .....	69
	5.2.1 Matérias-primas e procedimentos .....	69
	5.2.2 Dosagem e formas de processamento .....	69
	5.2.3 Moldagem dos corpos de prova CMP.....	71
	5.2.4 Processos de caracterização das amostragens de controle e compósitos .....	72
	5.3 Resultados e discussões .....	73
	5.3.1 CMP e Amostras de Controle .....	73
	5.3.2 Caracterização das amostragens de controle e compósitos.....	74
	5.4 Conclusão .....	83
	5.5 Referências Bibliográficas.....	85
6	Considerações Finais.....	90

# CAPÍTULO 1

---

Introdução

# **1 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

## **1.1 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação foi estruturada em seis capítulos, cujos principais aspectos abordados em cada um deles são relacionados a seguir.

O Capítulo 1 aborda a motivação, justificativa e originalidade do trabalho. Também são descritos seus objetivos, geral e específicos, assim como seu planejamento experimental. Os Capítulos 2, 3, 4 e 5 abordam etapas específicas do trabalho, com objetivos significativamente diferentes, mas, ainda assim, dentro do seu escopo original. Neste caso, cada um destes capítulos consistirá em um artigo completo, formatado majoritariamente de acordo com as instruções do periódico ou congresso de interesse para publicação. O Capítulo 6 abordará as Considerações Finais do trabalho, além de apresentar as respostas aos objetivos do mesmo, reunindo as principais descobertas da pesquisa como um todo, assim como sugestões para trabalhos futuros.

Para facilitar a leitura, houve uma compatibilização da formatação visual destes capítulos, principalmente as figuras e tabelas que compõe o texto. Foi estabelecido também um padrão para citações e referências bibliográficas.

## **1.2 Motivação, justificativa e originalidade**

Quando a Organização Mundial da Saúde (OMS) declarou estado de pandemia global devido à disseminação do Novo Coronavírus (SRAS-COV-2), causador da Covid-19, o mundo entrou em uma crise sanitária e econômica (MARQUES, 2020). Mesmo com o avanço da vacinação, no Brasil são quase 32 milhões de casos confirmados, segundo os dados mais recentes do Ministério da Saúde, tendo sido confirmadas mais de 673 mil mortes (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2021). Com a crise na saúde, houve uma sensível crise político-econômica, sobretudo financeira e social. Devido à pandemia, em 2020, o Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil caiu 4,1%. Os órgãos oficiais de outros países também apresentaram queda; com exceção da China, primeiro país a lidar com a pandemia e único a registrar PIB positivo em 2020 (CATTAI/G1, 2021).

Entretanto, no Brasil, alguns setores entraram na contramão da crise econômica durante a pandemia, como é o caso das indústrias de papelão ondulado e Tecido Não Tecido (TNT). A exemplo, uma empresa paulista especializada na fabricação de caixas de papelão, registrou, em março de 2020, crescimento de 18% em comparação com março de 2019 (PREDICADO COMUNICAÇÃO, 2020). E, segundo a Associação Brasileira de Papelão ondulado, a expedição do material atingiu mais de 350 mil toneladas em setembro de 2020, aumento de 15,41% em relação ao ano anterior, sendo o volume expedido no 3º trimestre de 2020, o maior desde 2005 (ABPO, 2020). Este crescimento pode ser atribuído ao aumento do consumo de embalagens de papelão por outros setores: o de higiene pessoal, limpeza, produtos farmacêuticos e o *e-commerce*. Isso porque, com o isolamento social, as compras *online* aumentaram drasticamente, sendo que 61% dos consumidores *online* aumentaram o volume de compras durante a pandemia. (PREDICADO COMUNICAÇÃO, 2020; REDAÇÃO E-COMMERCE BRASIL, 2020).

Paralelamente, umas das maiores produtoras de TNT do país, localizada em Santa Catarina, relatou, em abril de 2020, que a pandemia fez sua produção duplicar. Isso porque o TNT é utilizado para a confecção de Equipamentos de Proteção Individual (EPI), como máscaras, aventais, propés e toucas (ACIC, 2020). A estimativa da OMS era de que seriam necessárias no mundo 89 milhões de máscaras cirúrgicas por mês, somente para o setor da saúde (FISCHER *et al.*, 2020).

O aumento na produção destes materiais para atender às novas demandas diante à pandemia ocasionou uma alta taxa de exploração de recursos naturais e geração intensificada de resíduos sólidos. Este são dois dos principais problemas enfrentados para se alcançar o desenvolvimento sustentável (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2022). Uma alternativa em potencial para o reaproveitamento dos resíduos de máscaras de TNT e de papelão ondulado, é a produção de Compósitos Madeira-Plástico (CMP), comercialmente conhecidos como madeiras plásticas, que utilizam diferentes resíduos como insumo (KESKISAARI; KARKI, 2018).

Como qualquer compósito, os CMP são compostos por dois ou mais constituintes diferentes. A matriz, fase contínua que dá forma ao material, pode ser constituída por diversos polímeros, inclusive os recicláveis (CHUN *et al.*, 2019). Ocorre que um dos polímeros mais utilizados na produção de CMP é justamente o PP, sendo este a principal matéria-prima do TNT. A carga de enchimento ou reforço dos CMP, que pode ser adicionada para aumentar a

rigidez da matriz, é constituída geralmente por resíduos de madeira. Entretanto, outros materiais celulósicos podem ser utilizados como carga (KIELING *et al.*, 2019). Como o papelão é um produto à base de lignocelulose reforçada, ele tem potencial para substituir a farinha de madeira como carga de enchimento dos CMP.

Além do reaproveitamento dos resíduos de TNT e papelão ondulado, a produção destes CMP contribuirá também para a diminuição da exploração de madeiras naturais destinadas à fabricação de materiais para construção civil. Vale salientar que a crescente monocultura, de cunho comercial, de espécies como o Eucalipto e Pinus, por exemplo, apresenta uma ameaça significativa à biodiversidade original, considerando o seu potencial invasor e de degradação ambiental (RESUENO *et al.*, 2018).

Uma ampla revisão de literatura sobre CMP com material reciclado mostrou que produtos à base de lignocelulose reforçada, como é o caso do papelão, não foram testados como carga nos trabalhos científicos encontrados. Da mesma forma, o PP, quando utilizado como matriz polimérica, não é extraído de máscaras à base de TNT. Em síntese, os CMP se apresentam como uma inovadora possibilidade, ainda a ser explorada, para a destinação dos resíduos supracitados. Além disso, é um material com amplas propriedades e versatilidade de produção e formatos, o que o torna atrativo em diversas aplicações do setor construtivo.

### **1.3 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é verificar a aplicabilidade de materiais residuais pandêmicos (máscaras de TNT e papelão ondulado) como matéria-prima na produção de CMP.

### **1.4 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos podem ser resumidos da seguinte maneira:

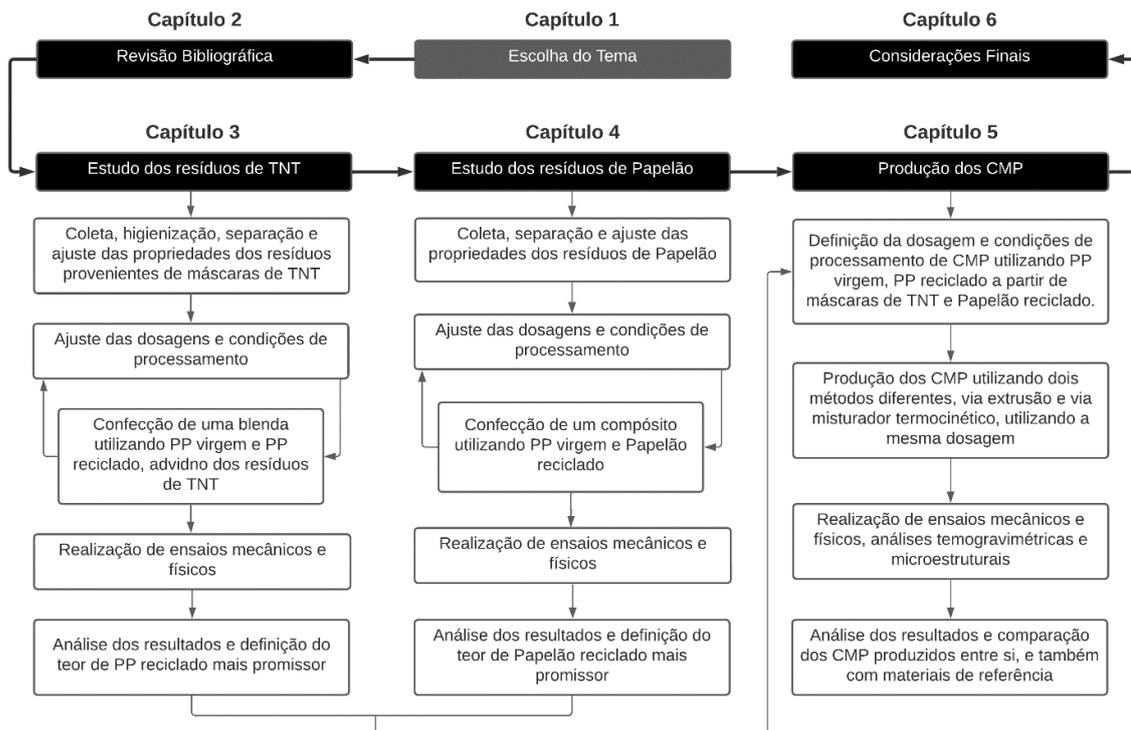
- Investigar o estado da arte e aprofundar o conhecimento teórico a respeito dos CMP, por meio de uma revisão bibliográfica;
- Investigar as condições de processamento dos materiais residuais (máscaras de TNT e papelão ondulado) a serem utilizados na produção de CMP;

- Obter e avaliar as propriedades físicas dos materiais residuais (máscaras de TNT e papelão ondulado) a serem utilizados na produção de CMP;
- Investigar as composições, proporções de misturas e condições de moldagem dos CMP;
- Obter e avaliar as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais dos CMP.

## 1.5 Plano de ação

Para alcançar os objetivos apresentados, foi proposto um plano de ação, sintetizado no fluxograma da Figura 1.1, em conformidade com os capítulos que compõe a estrutura do Texto. Este plano de ação possui uma estruturação linear, embora possam ser observadas algumas atividades cíclicas que proporcionaram o ajuste de parâmetros e aprimoramento da metodologia.

**Figura 1.1 – Plano de ação**



**Fonte: Elaborado pelo autor**

## 1.6 Referências Bibliográficas

ABPO Associação Brasileira do Papelão Ondulado. *Boletim Estatístico 2020*. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.abpo.org.br/boletim-estatistico>. Acesso em: 07 fev. 2021

ACIC Associação Empresarial de Caçador. *Grupo Sul Brasil de Caçador dobra produção no enfrentamento ao Covid-19*. Portal de notícias Caçador Online. Disponível em: <https://www.cacador.net/noticias/geral/2020/04/13/industria-grupo-sul-brasil-de-cacador-dobra-producao-no-enfrentamento-ao-covid-19-48005>. Acesso em: 10 mar. 2021.

CATTAL, Anderson. *Pib anual dos países*. G1, 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/03/03/desempenho-do-pib-do-brasil-em-2020-supera-o-de-latinos-e-europeus-mas-pais-deve-ficar-para-tras-este-ano.ghtml>. Acesso em: 10 mar. 2021.

CHUN, Koay Seong *et al.* Wood plastic composites made from post-used polystyrene foam and agricultural waste. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, v. 32, n. 11, p. 1455-1466, 2019.

FISCHER, Emma P. *et al.* Low-cost measurement of face mask efficacy for filtering expelled droplets during speech. *Science Advances*, [s. 1.], v. 6, 2 set. 2020. DOI: 10.1126/sciadv.abd3083. Disponível em: <https://advances.sciencemag.org/content/6/36/eabd3083>. Acesso em: 7 fev. 2021.

KESKISAARI, Anna; KÄRKI, Timo. The use of waste materials in wood-plastic composites and their impact on the profitability of the product. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 134, p. 257-261, 2018.

KIELING, A.; PEREIRA, S.; DOS SANTOS, Maria Cristina. Compósitos de madeira plástica: considerações gerais. *Scientia Amazonia*, v. 8, n. 1, p. B1-B14, 2019.

MARQUES, Rosa Maria. *Crise sanitária e crise econômica: o mundo em convulsão*. Observatório da Democracia, 2020. Disponível em: <https://observatoriodademocracia.org.br/2020/04/09/%ef%bb%bfcrise-sanitaria-e-crise-economica-o-mundo-em-convulsao/>. Acesso em: 19 out. 2021.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. *Coronavírus Brasil*, 2021. Disponível em: <https://covid.saude.gov.br/>. Acesso em: 12 jul. 2022.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. Objetivo de Desenvolvimento Sustentável. 2022. Disponível em <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/>. Acesso em: 14 jul. 2022.

PREDICADO COMUNICAÇÃO. *Mesmo em meio à pandemia, indústria de papelão segue forte*. Mazurky – Caixas de papelão ondulado, 2020. Disponível em: <https://www.mazurky.com.br/ultimas-noticias/releases/mesmo-em-meio-a-pandemia-industria-de-papelao-segue-forte/>. Acesso em: 10 mar. 2021.

REDAÇÃO E-COMMERCE BRASIL. *Covid-19: 61% dos consumidores aumentaram volume de compras online*. E-Commerce Brasil, 2020. Disponível em: <https://www.ecommercebrasil.com.br/noticias/consumidores-aumentaram-compras-online-coronavirus/>. Acesso em: 10 mar. 2021.

RESUENO, LUCAS HENRIQUE FERNANDES *et al.* *Ciências Ambientais e o Desenvolvimento Sustentável na Amazônia 3*. Atena Editora. Ponta Grossa (PR), 2018.

# CAPÍTULO 2

---

Aspectos e propriedades dos Compósitos Madeira-  
Plástico: uma revisão sistemática

## 2 CAPÍTULO 2 – ASPECTOS E PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS MADEIRA-PLÁSTICO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

### Resumo

---

O presente trabalho apresenta uma revisão sistemática das pesquisas mais recentes acerca de Compósitos Madeira-Plástico (CMP). Estes compósitos possuem uma matriz polimérica e uma carga de enchimento formada por resíduos de madeira ou outro material fibroso. O processo de revisão de literatura foi realizado utilizando o método *Systematic Search Flow* adaptado. Os materiais constituintes, processos de produção e propriedades física (absorção de água) e mecânicas (resistências à flexão e tração) foram descritos e discutidos de forma abrangente. O polipropileno e resíduos de madeira foram os materiais mais empregados como matriz polimérica e carga dos CMP, respectivamente. O processo de extrusão, separado ou aliado a outros processos como a injeção, foi amplamente utilizado em CMP à base de termoplásticos; enquanto o *hand lay-up* foi o mais utilizado em CMP à base de termofixos. Os compósitos que apresentaram o melhor desempenho mecânico na tração e flexão foram os que utilizam o polipropileno, carga de madeira e agente compatibilizante, principalmente o anidrido maleico. Diante de sua versatilidade de composição, produção e desempenho, os CMP se mostram uma promissora alternativa para solucionar o problema da poluição de resíduos plásticos e redução da exploração de madeiras naturais, tornando os processos construtivos mais sustentáveis e ecológicos.

**Palavras-chave:** Compósito Madeira-Plástico, Polímeros, Madeira plástica, Revisão de literatura.

---

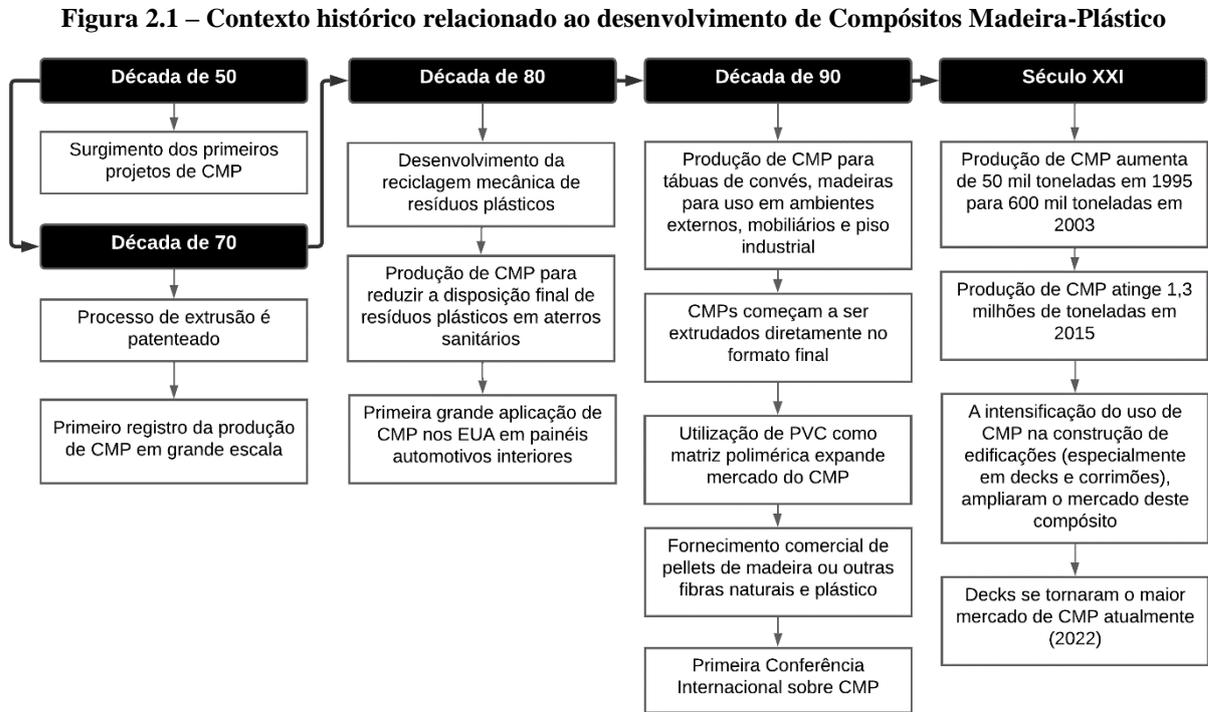
## 2.1 Introdução

O atendimento das necessidades da presente e das futuras gerações, assim como sua continuidade e expansão, compõe a premissa do desenvolvimento sustentável (BOFF, 2016). Dois dos principais problemas enfrentados para se alcançar este desenvolvimento são a alta taxa de exploração de recursos naturais e a geração de resíduos sólidos. Segundo relatório do Banco Mundial, aproximadamente 2,01 bilhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são geradas anualmente pelo mundo, e espera-se que esse número chegue a 3,40 bilhões de toneladas em 2050, um aumento de quase 70% (KAZA *et al.*, 2018). Dentre os resíduos, o plástico destaca-se como um passivo ambiental de ordem mundial, correspondente a 12% dos RSU (KAZA *et al.*, 2018; KIELING; SANTANA; DOS SANTOS, 2019).

Uma alternativa para a reciclagem dos resíduos plásticos, que também contribui para a redução da exploração de madeiras naturais, são os Compósitos Madeira-Plástico (CMP) (PORTELA JUNIOR *et al.*, 2019). Assim como outros compósitos, o CMP é formado por dois ou mais constituintes diferentes, geralmente uma matriz polimérica, fase contínua que dá forma ao compósito, e uma carga de reforço ou enchimento (CARDARELLI, 2000). Enquanto a matriz transmite esforços aplicados externamente para a carga de reforço e protege suas fibras de danos externos, a carga confere resistência e rigidez aos compósitos (SABA *et al.*, 2016). Os CMP suportam intempéries e são tolerantes à umidade e ao mofo, o que torna seu uso propício ao ar livre, onde o uso de madeiras naturais é contraindicado (CLEMONS, 2002). CMP também apresentam vantagens associadas à maior resistência a pragas e fungos, quando comparados à madeira natural (CABRAL *et al.*, 2016).

A matriz de um CMP pode ser constituída de diversos polímeros recicláveis, como o polipropileno, polietileno e espuma de poliestireno (CHUN *et al.*, 2019). A carga de enchimento ou reforço, incorporada a esta matriz, é constituída geralmente por resíduos de madeira (BASALP *et al.*, 2020). Entretanto, outros materiais celulósicos podem ser utilizados como carga, como é o caso da fibra de coco, bambu ou casca de arroz (KIELING; SANTANA; DOS SANTOS, 2019). Além de contribuir com a reciclagem de resíduos poluentes e com a redução do corte de árvores, os CMP possuem variadas aplicações potenciais. Por exemplo, são usados na indústria automotiva (painéis ou portas dos veículos) e na construção civil (revestimentos de pisos internos, perfilados para portas e janelas, painéis ornamentais, persianas, pavimentos, portas de garagem ou de entrada e outros componentes) (JUBINVILLE *et al.*, 2021). O

fluxograma a seguir (Figura 2.1) apresenta o contexto histórico envolvendo o CMP, desde seu surgimento na década de 50 até suas principais aplicações atuais. Esta evolução pode ser apreciada na revisão elaborada por Kieling, Santana e Dos Santos (2019).



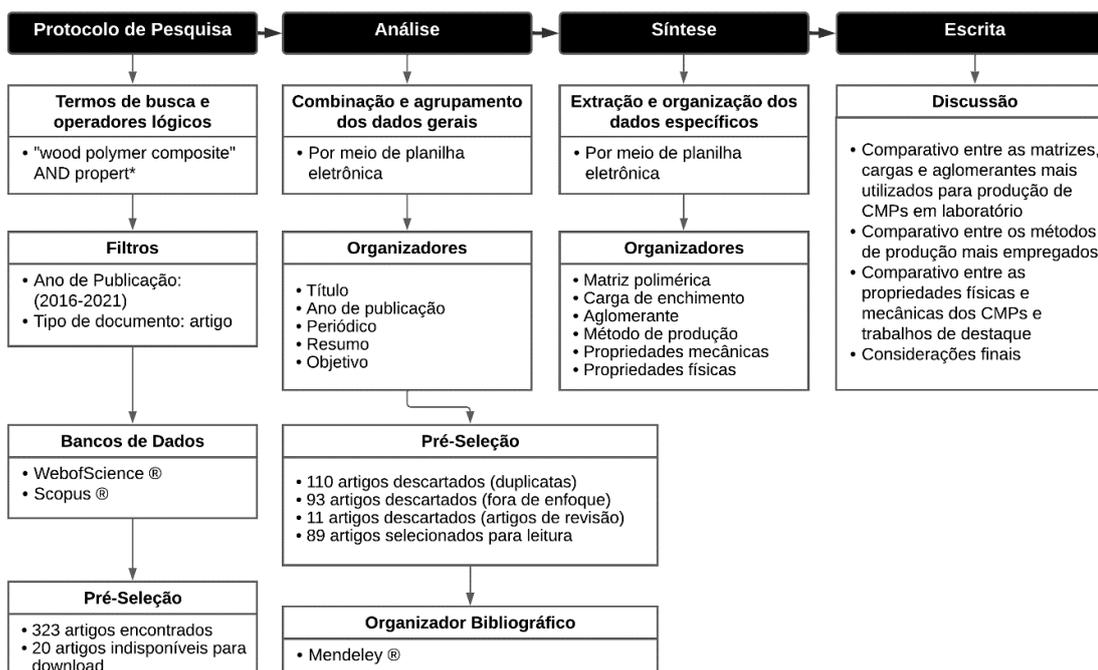
**Fonte: Adaptado de Kieling, Santana e dos Santos (2019).**

Trabalhos de revisão de literatura acerca de CMP são encontrados com foco em tipos específicos de matrizes (JUBINVILLE *et al.*, 2020), cargas (ALPÁR; MARKÓ; KOROKNAI, 2017), métodos de produção (FRIEDRICH, 2021), agentes compatibilizantes (HEJNA *et al.*, 2020) e propriedades (FRIEDRICH, 2018). A presente pesquisa se apresenta de forma mais abrangente, englobando todos os aspectos citados e adotando ferramentas gráficas que facilitam a visualização dos principais aspectos associados aos seus materiais componentes e métodos de produção. Apresenta ainda análises do comportamento físico e mecânico dos CMP por meio da distribuição e valores discrepantes dos dados encontrados através de ensaios de laboratórios, publicados em trabalhos relevantes e atuais.

## 2.2 Metodologia

Uma revisão sistemática de literatura foi realizada baseada no método *Systematic Search Flow* (SSF) adaptado (FERENHOF; FERNANDES, 2016). O Fluxograma apresentado na Figura 2.2 mostra como as quatro etapas do método SSF foram utilizadas para identificar os principais materiais, processos de fabricação e propriedades dos CMP, obtidas por meio de ensaios laboratoriais.

**Figura 2.2 – Etapas do processo de revisão de literatura pelo método SSF adaptado (FERENHOF; FERNANDES, 2016).**



Fonte: Elaborado pelo autor.

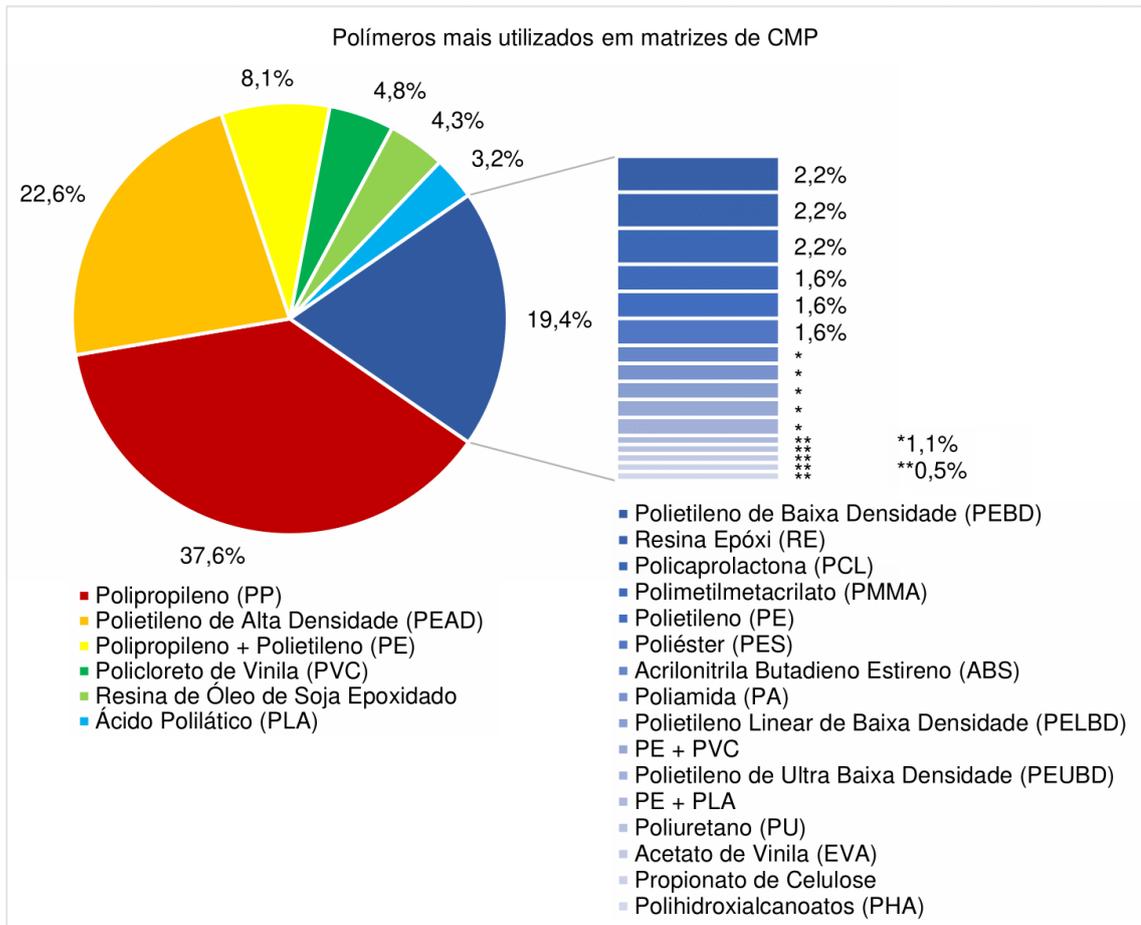
As discussões apresentadas a seguir compreendem a fase final do método, referente à consolidação dos resultados por meio da escrita científica. Para fins de discussão, foram considerados nesta revisão 186 CMP diferentes, descritos nos 89 artigos selecionados. Considerou-se, num mesmo trabalho, CMP diferentes aqueles que apresentaram alguma mudança em seus materiais constituintes ou métodos de produção.

### 2.3 Matriz Polimérica

Como pode ser observado na Figura 2.3, a matriz dos CMP é composta em sua grande maioria por polímeros termoplásticos, com destaque para o Polipropileno (PP) (GILL *et al.*, 2021; SHOJAIE *et al.*, 2020; BOUHAMED *et al.*, 2020; MAZZANTI *et al.*, 2020; KALALI *et al.*, 2019; MYSIUKIEWICZ *et al.*, 2019; VOLFSON *et al.*, 2017; KRAUSE *et al.*, 2017; FRAÇZ; JANOWSKI, 2019) e o Polietileno de Alta Densidade (PEAD) (HUANG; ZHANG; ZHOU, 2020; AL-MAQDASI *et al.*, 2020; JIANG *et al.*, 2020; BARBOS *et al.*, 2020; MOHAMED *et al.*, 2019; HUANG *et al.*, 2020). A mistura de PP com algum tipo de PE aparece como o terceiro tipo de matriz mais utilizado (WANG *et al.*, 2019; MARTIKKA; KÄRKI, 2019). Outros tipos de Polietileno (PE) também aparecem em menor quantidade, quando comparados com o PEAD, como o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) (MOHAMMED; MEINCKEN, 2021), Polietileno Linear de Baixa Densidade (PELBD) (KUMAR *et al.*, 2020) e o Polietileno de Ultra Baixa Densidade (PEUBD) (BARCZEWSKI *et al.*, 2018).

Os polímeros termofixos representam baixa aplicação como matrizes nos CMP quando comparados aos termoplásticos. A preferência pelos polímeros termoplásticos pode ser explicada pela sua facilidade de reprocessamento, utilizando o mesmo ou outro processo de transformação. Enquanto os polímeros termofixos se tornam permanentemente rígidos durante sua formação e não amolecem sob aquecimento; os termoplásticos amolecem quando aquecidos e endurecem quando resfriados, sendo que estes processos são reversíveis e podem ser repetidos (CALLISTER; RETHWISCH, 2020). Os termofixos mais aplicados em CMP, dentre os estudos levantados na revisão, foram o Poliéster (PES), o Poliuretano (PU) e a Resina Epóxi (RE) (PATEL; RAWAT, 2017; KHAN; SRIVASTAVA; GUPTA, 2021; LUBIS *et al.*, 2020).

**Figura 2.3 – Polímeros mais utilizados em matrizes de CMP.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como mencionado, os principais tipos de polímeros empregados em matrizes poliméricas de CMP são o PP e o PE (RENNECKAR *et al.*, 2004). Além do preço destes polímeros ser inferior ao de outros plásticos de engenharia, suas temperaturas de processamento são inferiores a 200 °C (YADAV; LUBIS; SIHAG, 2021). A carga, quando derivada da madeira, pode ser queimada se exposta a temperaturas de processamento maiores que esta, o que torna esta propriedade um diferencial no momento da escolha dos materiais (YAMAJI; BONDUELLE, 2004).

Yadav *et al.* (2021) destacam, além do PP e PE, o PVC como um dos componentes mais recorrentes na aplicação de matrizes de CMP, sendo este representante de 4% dos trabalhos revisados (ABDRAKHMANOVA *et al.*, 2021; SAMUILOVA *et al.*, 2020; MATSEEVICH; ASKADSKII; KONDRASHCHENKO, 2019; MATSEEVICH; MATSEEVICH; ASKADSKII, 2019). O PVC apresenta maior compatibilidade com materiais lignocelulósicos,

uma vez que, possui estrutura molecular hidrofílica, diferentemente do PP e PE, e possui cloro em sua composição, que atua como retardante de chama (YEH, 2007). Entretanto, este polímero possui dioxinas que podem ser liberadas durante sua fabricação, quando exposto ao fogo, o que o torna prejudicial ao mercado dos CMP (YADAV; LUBIS; SIHAG, 2021).

Os óleos vegetais, que figuram em 4,3% dos estudos levantados, se qualificam como produtos naturais biodegradáveis com baixa toxicidade, encontrados em abundância e a baixos custos (MANDAL *et al.*, 2018). Desta forma, os óleos vegetais, como o óleo de soja e de linhaça, têm sido aplicados na síntese de resinas termofixas com enfoque biológico, uma vez que possuem sítios reativos, dados pelas duplas ligações, sendo que estas podem ser funcionalizadas pela epoxidação (ADEKUNLE, 2014). Entretanto, os óleos vegetais não contemplam ligações insaturadas e éster suficientemente efetivos para o aprimoramento da reatividade, e conseqüente sintetização da resina a ser produzida (MANDAL; NATH; MAJI, 2018). Assim, para a aplicação e aprimoramento das propriedades de um CMP com matriz de óleo de soja epoxidado, Mandal e Maji (2017) modificaram o material com ácido acrílico, metacrílico e anidrido metacrílico para melhorar a reatividade e densidade de reticulação do ácido graxo do óleo de soja.

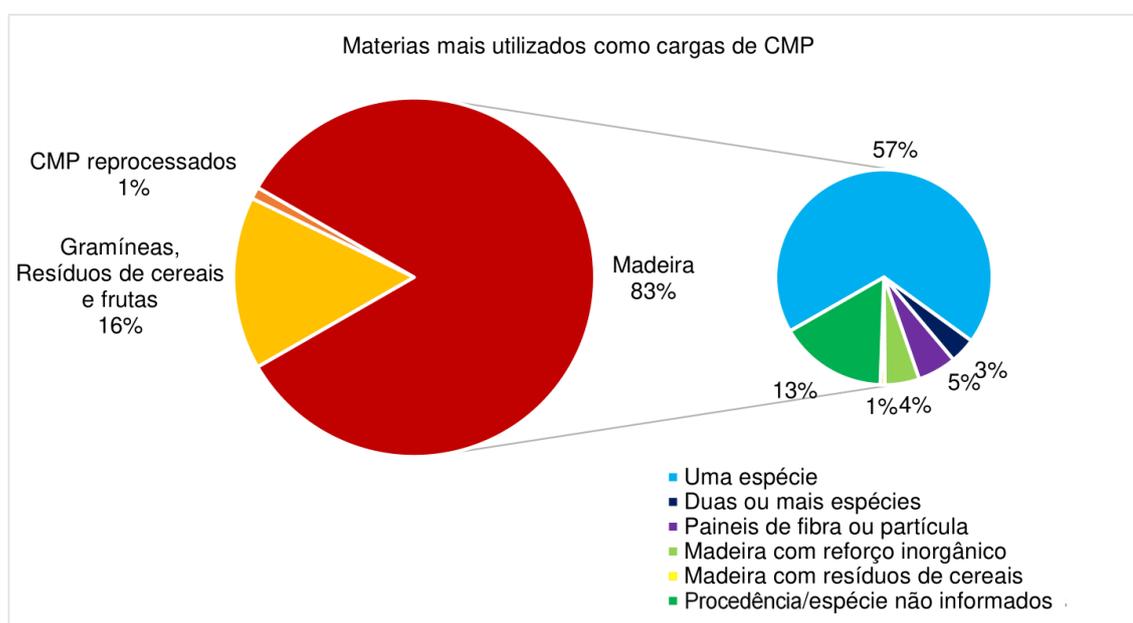
Destaca-se também, entre os CMP, a utilização de um biopolímero: o Ácido Polilático (PLA), termoplástico que integra 3,2% das matrizes poliméricas dos estudos encontrados. O material advém do ácido lático a partir de recursos agrícolas, com propriedades comparáveis às de polímeros convencionais como o PP e PE, possuindo alta rigidez, estabilidade a raios ultravioleta e melhor processabilidade térmica do que outros biopolímeros (PETINAKIS; YU; SIMON, 2013). Além do que, ao serem aplicados em CMP e conseqüentemente combinados com cargas de reforço, suas propriedades mecânicas podem ser aprimoradas (PICKERING; ARUAN EFENDY, 2016).

## **2.4 Carga**

Partículas de madeira natural processada, seja em forma de farinha ou de fibra, são o material mais comum em cargas de reforço de CMP, como pode ser observado na Figura 2.4. Esta escolha pela fibra de madeira incorporada à matriz polimérica geralmente é feita visando reduzir o custo geral do CMP e também melhorar suas propriedades mecânicas (ZHANG; CUI; ZHANG, 2013). Além disso, a madeira é renovável e biodegradável e suas características

geralmente são creditadas a materiais considerados ambientalmente amigáveis (ROWELL, 2005). Mais de 80% dos CMP produzidos nas pesquisas têm carga de madeira, composta de uma única espécie arbórea ou de duas ou mais espécies simultâneas (MANDAL *et al.*, 2020b; RATHNAM *et al.*, 2020; BARTON-PUDLIK; CZAJA, 2018; SOZEN; ZOR; AYDEMIR, 2018; WANG *et al.*, 2019). Há ainda pesquisas que utilizam madeira com reforço inorgânico, como por exemplo giz (MATSEEVICH; ASKADSKII; KONDRASHCHENKO, 2019), vidro (FAYZULLIN *et al.*, 2019), aramida (ZHANG *et al.*, 2019), placas de circuito impresso (TIAN *et al.*, 2019) e até mesmo partículas reprocessadas de CMP (KRAUSE *et al.*, 2018).

**Figura 2.4 – Tipos de carga mais utilizados em CMP.**



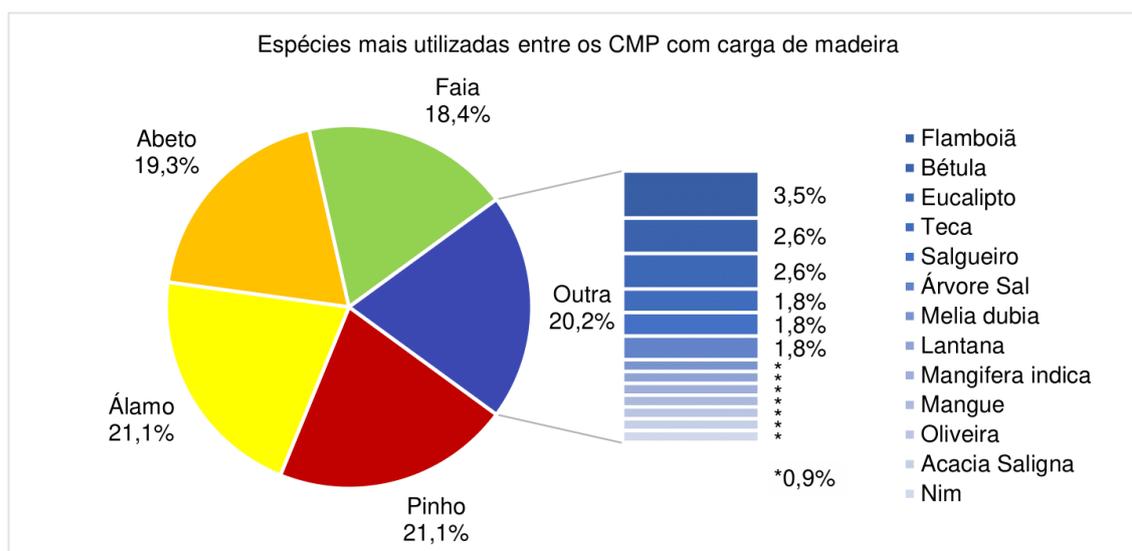
**Fonte: Elaborado pelo autor.**

Outros materiais de origem vegetal, diferentes da madeira, também são empregados como carga, geralmente gramíneas, resíduos de cereais ou frutas. São exemplos: bambu (DE LIMA; RODRÍGUEZ; HERNANDEZ, 2021), casca de arroz (ZAINI *et al.*, 2017), casca de tangerina (HEJNA *et al.*, 2021), casca de aveia (BOCHKOV *et al.*, 2019), farelo de trigo (HEJNA *et al.*, 2020), casca de girassol (BARCZEWSKI *et al.*, 2018), palha e espiga de milho (CHEN *et al.*, 2018; WANG; MEI; ZHANG, 2021), folhas de tamareira (ELMUSHYAKHI, 2021), caroço de azeitona (GUMU *et al.*, 2019), pele de café (HEJNA *et al.*, 2021), entre outros. Há ainda trabalhos que utilizam cargas mistas de madeira com outros materiais vegetais como pele de café e grãos residuais de cervejarias (HEJNA; KOROL; *et al.*, 2021). A obra de Klyosov (2007)

destaca esta possibilidade de utilizar resíduos de plantas agrícolas ou outros tipos de fibra natural além da tradicional farinha de madeira ou serragem.

Entre os trabalhos com carga de madeira que citam as espécies empregadas, as mais utilizadas são respectivamente Pinho (PEERBOOMS; PICKERING, 2018; CHAN *et al.*, 2018; GILL *et al.*, 2021), Álamo (JAUNSLAVIETIS *et al.*, 2019; JAUNSLAVIETIS *et al.*, 2017; JIANG *et al.*, 2019), Abeto (MICHALSKA-POZOGA; WEGRZYK; RYDZKOWSKI, 2017; LAHTELA; KÄRKI, 2021; TIAN *et al.*, 2019) e Faia (AYDEMIR *et al.*, 2019; QUITADAMO; MASSARDIER; VALENTE, 2018), como mostra a Figura 2.5. Outras espécies são empregadas com menos frequência. É o caso do Flamboiã (MANDAL *et al.*, 2020b), Bétula (STADLMANN *et al.*, 2021; SHULGA *et al.*, 2019), Eucalipto (BARBOS *et al.*, 2020), Teca (PATEL; RAWAT, 2017), Salgueiro (BARTON-PUDLIK; CZAJA, 2018), Árvore Sal (KHAN; SRIVASTAVA; GUPTA, 2021), entre outras.

**Figura 2.5 – Espécies arbóreas mais utilizadas como carga de madeira.**



**Fonte: Elaborado pelo autor.**

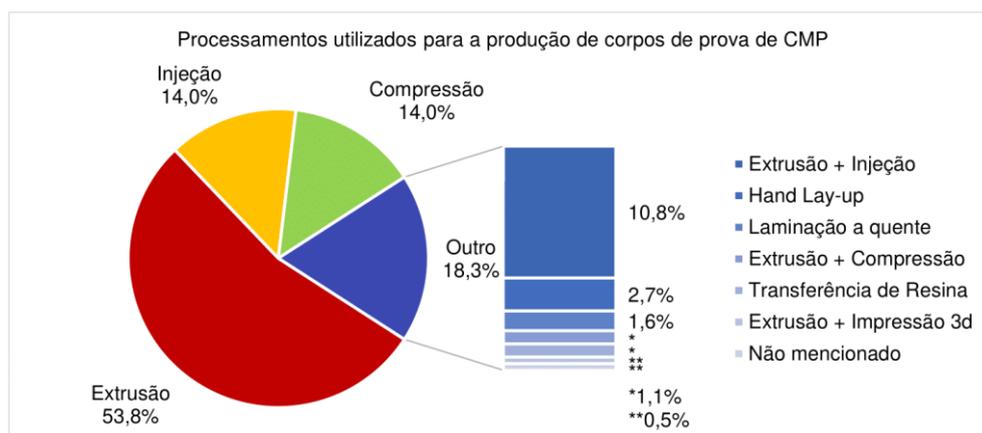
Vale observar que, independente da origem, todos estes enchimentos são materiais naturais, contendo celulose, hemicelulose e lignina. Enquanto a celulose favorece algumas propriedades mecânicas do CMP como um coeficiente de expansão/contração térmica reduzido, a lignina geralmente enfraquece o CMP, deixando-o menos denso e acelerando o seu desbotamento após a exposição ao ar livre. A hemicelulose, por sua vez, se decompõe facilmente quando exposta às temperaturas de fusão da matriz polimérica e forma ácido acético,

que pode causar corrosão significativa no equipamento utilizado para processamento (KLYOSOV, 2007).

## 2.5 Método de produção

A extrusão é o principal método de produção de CMP utilizado entre as pesquisas mais recentes (MARTIKKA; KÄRKI, 2019; WANG *et al.*, 2020; HUANG *et al.*, 2020; KRAUSE *et al.*, 2017; BÜTÜN *et al.*, 2018; PRAPRUDDIVONGS; SOMBATSOMPOP, 2017; WANG; CHEN; *et al.*, 2019; TUNCEV; SATTAROVA; GALIEV, 2017). Na revisão proposta por Yadav, Lubis e Sihag (2021) a extrusão também se destaca em relação aos outros métodos de produção. Como pode ser visto na Figura 2.6, mais da metade dos compósitos foram produzidos por este método.

**Figura 2.6 – Principais métodos de processamento empregados nas pesquisas envolvendo CMP.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

O objetivo principal da extrusão é fundir o polímero e misturá-lo com a carga e os aditivos à proporção em que o material é forçado de forma contínua pelo interior de uma matriz (GARDNER; HAN; WANG, 2015). Esta otimização pode explicar porque a extrusão é tão utilizada, visto que além de moldar o compósito, o mesmo equipamento pode ser utilizado para os processos de mistura e fusão dos materiais.

Dois outros métodos de produção que se destacam nos trabalhos são a moldagem por injeção (STADLMANN *et al.*, 2021; FRĄCZ; JANOWSKI, 2018; RATHOD *et al.*, 2017; FRĄCZ; JANOWSKI, 2019; SIWEK *et al.*, 2018; CHAN-HOM *et al.*, 2016) e moldagem por compressão (LAZRAK *et al.*, 2019; MANDAL; MAJI, 2017; MANDAL *et al.*, 2018; HUANG

*et al.*, 2020; HEJNA; KOSMELA, 2020; MIRSKI; DZIURKA; BANASZAK, 2019; MANDAL; NATH; MAJI, 2018). Na moldagem por injeção, o material fundido é forçado por uma rosca simples para o interior da cavidade de um molde. Na moldagem por compressão, a matriz polimérica e o material da carga são dispostos em uma cavidade do molde aquecido e são submetidos à pressão e calor, forçando os materiais a entrarem em contato com todas as áreas do molde (YADAV; LUBIS; SIHAG, 2021). É importante lembrar que alguns dos processos citados podem ser utilizados em conjunto, principalmente com a extrusão. Isso porque, o processo de extrusão pode ser utilizado como mistura, fusão e homogeneização dos materiais, ficando para a compressão ou injeção a função de moldagem propriamente dita (QUITADAMO; MASSARDIER; VALENTE, 2018; SOZEN; AYDEMIR; ZOR, 2017; HEJNA *et al.*, 2021; CHITRA *et al.*, 2018).

O *hand lay-up*, método utilizado em alguns trabalhos, é um dos processos de fabricação mais simples e antigo adotado para a fabricação de compósitos (KHAN; SRIVASTAVA; GUPTA, 2021; PATEL; RAWAT, 2017; NAGAMADHU; KUMAR; JEYARAJ, 2018). Nele, as fibras que compõem a carga são colocadas manualmente no molde e a matriz de resina é aplicada, também manualmente, no material de reforço (JAWAID; THARIQ, 2018). Na revisão proposta por Khan *et al.* (2020) o processo de *hand lay-up* destacou-se entre os compósitos que utilizavam termofixos.

Independente de qual tipo, as condições de processamento dos materiais para produção do CMP têm impacto direto sobre o produto final. Gardner *et al.* (2015) alertam para a temperatura de degradação da madeira. Os autores sugerem que as condições de processamento devem atender ao limite de 220 °C. Além disso, a secagem das fibras ou farinha de madeira é um pré-requisito importante para a produção de CMP, uma vez que o teor de água da madeira afetará significativamente o processamento e a qualidade do compósito (YADAV; LUBIS; SIHAG, 2021).

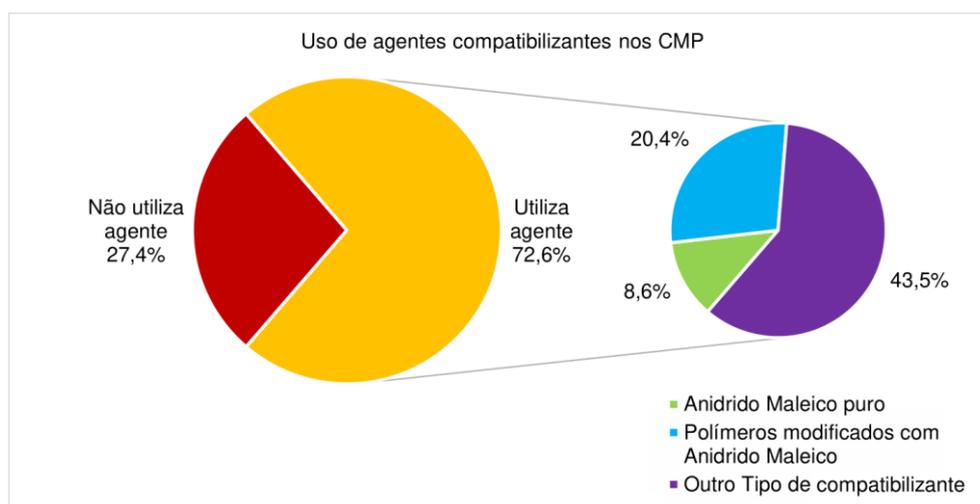
## **2.6 Agentes compatibilizantes**

Como visto, partículas de madeira são o material mais comum utilizado como carga. Por ser hidrofílica, ela pode se tornar incompatível com os polímeros termoplásticos hidrofóbicos, podendo ocorrer a delaminação das fibras na matriz polimérica (WANG 2007). Para sanar este tipo de problema, agentes compatibilizantes podem ser utilizados na composição dos CMP.

Eles aumentam a adesão interfacial dos polímeros, influenciando na ligação interna entre matriz e carga, o que resulta em uma morfologia mais estável e uma distribuição mais uniforme da fase dispersa (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017).

A grande maioria dos compósitos foi produzida utilizando agentes compatibilizantes, dos quais se destaca, por sua frequência, o Anidrido Maleico (AM), como mostra a Figura 2.7. Além de puro (MANDAL *et al.*, 2020a; GIRDIS *et al.*, 2017; SHOJAIE *et al.*, 2020), o AM foi utilizado para modificar diversos polímeros, utilizados posteriormente como compatibilizantes (BÜTÜN *et al.*, 2019; KALE *et al.*, 2017; MAZZANTI; MOLLICA, 2017; FORTINI; MAZZANTI, 2018).

**Figura 2.7 – Agentes compatibilizantes utilizados na produção de CMP.**



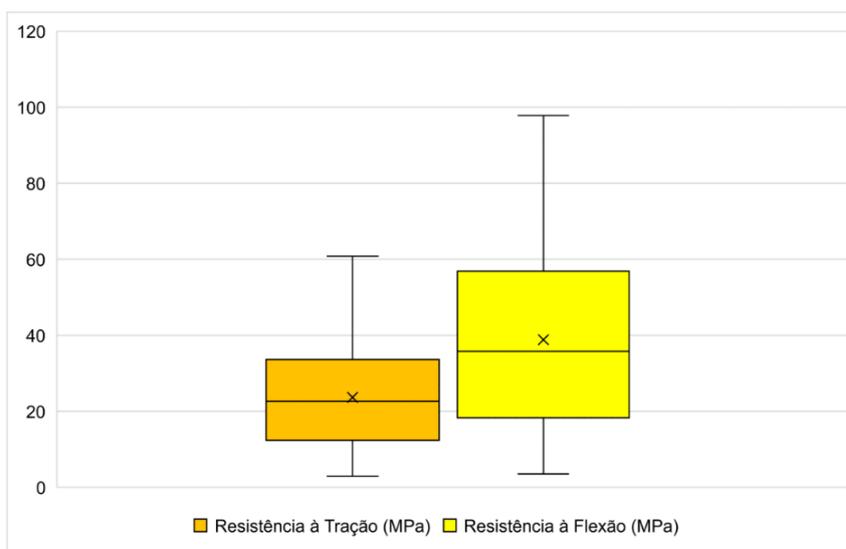
**Fonte: Elaborado pelo autor.**

Ainda que as vantagens de sua utilização tenham sido mencionadas, quase 30% dos CMP foram produzidos sem agentes compatibilizantes (LOURENÇON *et al.*, 2020; ADEBAYO *et al.*, 2019; MAZZANTI *et al.*, 2019; SHULGA *et al.*, 2019; HARTMANN; KOCH, 2017). Mesmo que estes compósitos não atinjam ao máximo suas propriedades mecânicas, visto que os compatibilizantes ajudam a melhorar a dispersão e fluxo das cargas na matriz, eles apresentam menos materiais e processos envolvidos em sua produção, o que os torna mais práticos e mais facilmente reproduzíveis.

## 2.7 Propriedades físicas e mecânicas

São diversas as propriedades avaliadas em pesquisas envolvendo CMP. No que se refere às propriedades mecânicas, a revisão sistemática apontou que os ensaios de resistência à tração e resistência à flexão são os mais recorrentes. Passaram por eles 83% e 52% dos CMP, respectivamente. Enquanto isso, o teste de absorção foi a propriedade física avaliada o maior número de vezes, em 25% dos compósitos. Ainda assim, diversos outros testes foram realizados em uma quantidade menor de CMP (inferiores a 25%), como por exemplo resistência ao impacto (FORTINI; MAZZANTI, 2018), ao cisalhamento (STADLMANN *et al.*, 2021) e ao desgaste (BOCHKOV *et al.*, 2019), ensaios de intemperismo e variação de cor (AYDEMIR *et al.*, 2019), viscosidade (FRĄCZ; JANOWSKI, 2018), dureza (MANDAL; NATH; MAJI, 2018) e inchamento (LAHTELA; KÄRKI, 2021). A Figura 8 apresenta, por meio de *boxplots*, a distribuição dos valores médios alcançados pelos CMP que foram submetidos aos ensaios de resistência à tração e flexão.

**Figura 2.8 – Resultados dos compósitos submetidos aos ensaios de resistência à flexão e resistência à tração.**



**Fonte: Elaborado pelo autor.**

Como pode ser observado, os valores médios de resistência à tração e flexão dos CMP apresentam assimetria positiva, visto que existe uma maior concentração na zona de valores mais reduzidos das amostras. Embora tenha sido uma propriedade aferida em uma menor quantidade dos compósitos, a resistência à flexão apresenta uma maior amplitude e dispersão (3,53 a 97,8 MPa) que a resistência à tração (2,89 a 60,8 MPa). Quase todos os valores acima

do 3º quartil de resistência à flexão são superiores ao valor máximo de resistência à tração, evidenciando um desempenho superior dos CMP quanto à primeira propriedade.

No que se refere à resistência à tração, destacam-se os CMP utilizando painéis de fibra (MDF) ou partícula (MDP) como carga. A grande maioria se encontra próxima aos valores máximos de resistência, acima de 42 MPa (BÜTÜN *et al.*, 2019; KRAUSE *et al.*, 2018; BÜTÜN *et al.*, 2018). Todos eles utilizaram PP como matriz, AM como agente compatibilizante e foram produzidos via extrusão. Os demais CMP utilizando os mesmos materiais e processos, com exceção dos agentes, figuram no 3º quartil, com valores próximos à tração média geral (23,68 MPa). Outros compósitos com valores médios expressivos de resistência à tração foram: PP com Lantana e AM, via extrusão (52,9 MPa) (KALE *et al.*, 2017), PP com Mélia Dúbia e aditivo não informado, via extrusão e injeção (53,7 MPa) (CHITRA *et al.*, 2018), PP com Álamo e AM, via injeção (56,06 MPa) e o maior valor de resistência encontrado: Polimetilmetacrilato (PMMA) com folhas de tamareira reforçado com Polietileno tereftalato (PET) e nanopartículas de alumina; e diisocianato de tolueno, via compressão (60,8 MPa) (ELMUSHYAKHI, 2021).

Entre os valores próximos à resistência à tração mínima, estão os compósitos de PP com farinha de Faia (2,89 MPa, menor valor encontrado) e Bétula (3,16 MPa), via injeção (STADLMANN *et al.*, 2021). Ainda, PP com farinha de Acácia via compressão (4,55 MPa) (MOHAMMED; MEINCKEN, 2021) e PE com Abeto via extrusão (4,91 MPa) (MICHALSKA-POZOGA; WEGRZYK; RYDZKOWSKI, 2017). Nenhum destes compósitos fez uso de agentes compatibilizantes, que poderiam melhorar as propriedades mecânicas das misturas. Um compósito utilizando PP com fibra de bambu via injeção, por exemplo, alcançou resistência à tração de 5,43 MPa. Em outro CMP, onde houve a substituição de 3% da carga de bambu por AM como agente compatibilizante, houve um aumento de 191% no valor da propriedade, que chegou a 15,83 MPa (DE LIMA; RODRÍGUEZ; HERNANDEZ, 2021).

Ainda assim, foram encontrados estudos com diferentes matrizes e cargas, sem o uso de agentes compatibilizantes, onde os valores da resistência à tração foram superiores a algumas composições de CMP que fizeram uso de agentes, sendo um indicativo de que a escolha dos materiais constituintes e processo de produção influenciam diretamente nas propriedades mecânicas do produto. Inclusive, a parte inferior do 1º quartil do *boxplot* de resistência à tração (menores valores), apresentado na Figura 8, contém vários trabalhos que utilizaram agentes

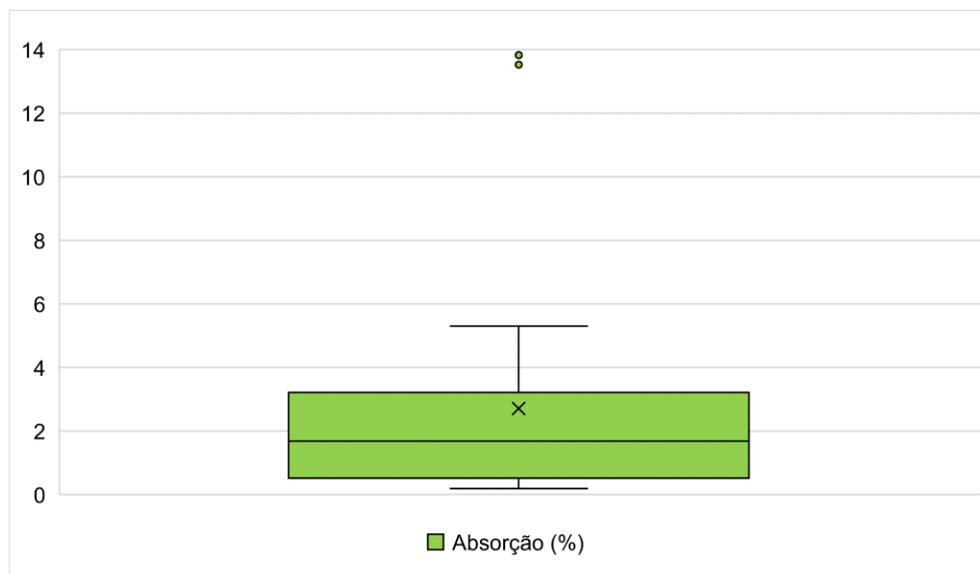
compatibilizantes na produção dos CMP, como PP e PE com farinha de madeira não identificada e AM (6,81 MPa) (WANG *et al.*, 2020), PP com Álamo e azodicarbonamida (6,91 MPa) (WANG; CHEN; *et al.*, 2019), PU com folha de dendê e óleo de palmeira (8,1 MPa) (LUBIS *et al.*, 2020), e PP e PE com Álamo e AM (8,70 MPa) (WANG *et al.*, 2019). Ao passo que, na parte superior do terceiro quartil (valores acima da média) encontram-se compósitos sem uso de compatibilizantes; por exemplo, o CMP produzido a partir de PP, farinha de madeira de abeto e resíduos de placas de circuito impresso (43,26 MPa) (TIAN *et al.*, 2019) e o CMP produzido a partir de PP com placas de MDF (59,2 MPa) (KRAUSE *et al.*, 2018).

Assim como na resistência à tração, os CMP produzidos via extrusão utilizando PP como matriz, MDF ou MDP como carga e AM como agente compatibilizante também foram destaques nos ensaios de resistência à flexão, figurando novamente entre os maiores valores de resistência, todos acima de 70 MPa (BÜTÜN *et al.*, 2019; KRAUSE *et al.*, 2018; BÜTÜN *et al.*, 2018). Um deles, inclusive, foi o CMP a alcançar o máximo valor médio nesta propriedade (97,8 MPa) (KRAUSE *et al.*, 2018). Três outros compósitos fazem parte da porção superior do último quartil do *boxplot* de resistência à flexão (maiores valores) apresentado na Figura 2.8, ambos com matriz polimérica termoplástica e carga composta por madeira submetida a pré-tratamento químico. São eles um CMP de RE com Pinus e Shorea robusta pré-tratados com silano via *hand lay-up* (94,0 MPa) (KHAN; SRIVASTAVA; GUPTA, 2021); um CMP de RE com Pinus e Shorea robusta submetidos a pré-tratamento alcalino via *hand lay-up* (84,0 MPa) (KHAN; SRIVASTAVA; GUPTA, 2021); e um CMP de resina de óleo de soja epoxidado com farinha de madeira tratada não especificada e AM, via compressão (72,49 MPa) (MANDAL; MAJI, 2017).

O menor valor de resistência à flexão corresponde ao CMP de PU com folha de dendê e óleo de palmeira, via extrusão (3,53 MPa) (LUBIS *et al.*, 2020), que também figura entre os compósitos com pior desempenho de resistência à tração. Este resultado está vinculado à orientação aleatória das fibras do CMP, o que reduz sua capacidade de transferir a carga de tração aplicada. Outros CMP que apresentaram valores mínimos de resistência incluem PP e PE com Álamo, reforçado com carga mineral de talco e AM, via extrusão (10,55 MPa) (WANG *et al.*, 2019); e PES com Teca e aditivos para catalisação e endurecimento (6,50 MPa) (PATEL; RAWAT, 2017). Ainda que a adição de resina de goma a este último compósito tenha melhorado sua propriedade de resistência à flexão (acréscimo de 9%), o novo CMP também consta entre os valores mínimos de resistência à flexão (7,11 MPa) (PATEL; RAWAT, 2017).

A Figura 2.9 apresenta, também por meio de um *boxplot*, a distribuição dos valores médios do percentual de absorção de água dos CMP em ensaios de 24 horas, correspondentes a 15% dos compósitos estudados.

**Figura 2.9 – Resultados dos compósitos submetidos ao ensaio de absorção de água**



**Fonte: Elaborado pelo autor.**

Como pode ser observado na Figura 2.9, há 2 valores discrepantes de absorção, representados por 2 *outliers* superiores. Um deles diz respeito à média de valores obtidos por um CMP de PELBD, PEAD e PVC com farinha de Mangifera Indica e PE-co-glicidil metacrilato, via compressão (13,83%) (RATHNAM *et al.*, 2020); e o outro, à média de valores alcançados por um CMP de PEB reciclado com lascas de Acácia misturados por meio de um liquidificador personalizado, via Prensa Hidráulica (13,53%) (MOHAMMED; MEINCKEN, 2021). Embora ambos os trabalhos associem os valores mais altos de absorção a maiores teores de carga, nenhum deles discorre a respeito da discrepância entre os valores obtidos em relação à grande parte das pesquisas envolvendo CMP.

A maior concentração de compósitos se encontra no primeiro quartil, tendo estes alcançado absorções menores que 0,51%. O valor médio mínimo alcançado foi de 0,17%, por um CMP de PVC com farinha de madeira (MATSEEVICH; ASKADSKII; KONDRASHCHENKO, 2019). Trata-se da continuação de uma pesquisa onde parte da carga de madeira foi substituída por giz, funcionando como carga mineral, visando justamente reduzir os valores absorção de água, sendo adicionada a esta mistura o plastificante Dioctil Ftalato (MATSEEVICH;

MATSEEVICH; ASKADSKII, 2019). Em contrapartida, os compósitos com maior absorção se encontram mais dispersos no último quartil, entre 3,21 e 5,3%. O último valor, alcançado pelo CMP com maior absorção, com exceção dos *outliers*, refere-se a um CMP de Propionato de Celulose com farinha de madeira não especificada, via injeção.

Ainda que alguns compósitos com baixo valor de absorção (abaixo da média geral: 2,70%) tenham sido produzidos por meio de extrusão (MATSEEVICH; ASKADSKII; KONDRASHCHENKO, 2019; BOCHKOV *et al.*, 2019; MAZZANTI; MOLLICA, 2017), aparentemente este processo influencia negativamente nesta propriedade. Clemons e Ibach (2004) examinaram CMP com a mesma composição, mas fabricados por métodos diferentes: extrusão, injeção e compressão. Os testes de absorção realizados mostraram que os compósitos extrudados absorveram mais água do que os compósitos moldados por compressão e por injeção, respectivamente. Os autores salientam que nas superfícies dos compósitos moldados por injeção se formou uma película rica em polímeros, devido às altas temperaturas e pressões de processamento, o que proporcionou uma resistência à umidade no compósito. No que diz respeito à compressão, este processo é considerado menos agressivo aos polímeros fundidos do que a extrusão e a injeção; além do fato de que, neste caso, as amostras são submetidas a pressões e temperaturas elevadas por mais tempo (SOUZA *et al.*, 2014), o que pode justificar os melhores resultados, quando comparados aos CMP extrudados.

## 2.8 Conclusão

Os resultados obtidos por meio desta revisão bibliográfica indicam uma vantagem dos CMP, que é sua versatilidade de composição e produção. Embora o PP, PE e a farinha de madeira sejam amplamente utilizados como componentes, há uma grande disposição de polímeros e materiais fibrosos que podem compor a matriz polimérica e carga de enchimento e reforço dos compósitos. A seleção destes materiais deve influenciar diretamente a escolha do método de produção, que tem condições limitadas, principalmente de temperatura, devido à natureza instável das cargas de enchimento. A extrusão, isolada ou combinada com outros métodos, se mostrou um processo eficaz, indicado para compósitos a base de termoplásticos, entretanto ela pode influenciar negativamente a propriedade de absorção dos compósitos, não sendo indicada para CMP direcionados a ambientes úmidos. Para termofixos, embora apareça de forma menos expressiva, o *hand lay-up* foi o método mais empregado. Os compósitos de PP

com carga de madeira e agente compatibilizante, principalmente AM, apresentaram o melhor desempenho mecânico na tração e flexão. Destacaram-se, neste caso, os CMP com uso de MDF ou MDP como carga. Assim, dada a versatilidade de composição, produção e desempenho, os CMP são uma promissora alternativa para solucionar o problema da poluição de resíduos plásticos à medida em que aumentam a vida útil de aterros sanitários e contribuem para a diminuição da exploração de madeiras naturais para fins comerciais, tornando os processos construtivos mais sustentáveis e ecológicos.

## 2.9 Referências Bibliográficas

- ABDRAKHMANOVA, L. A. *et al.* Efficiency of carbon nanostructures in the composition of wood-polymer composites based on polyvinyl chloride. *Nanotechnologies in Construction*, v. 13, n. 3, p. 150–157, 2021.
- ADEBAYO, Ganiyat Olusola *et al.* Influence of wood surface chemistry on the tensile and flexural properties of heat-treated mangrove/high-density polyethylene composites. *Polymer Bulletin*, v. 76, n. 12, p. 6467–6486, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00289-019-02731-0>>.
- ADEKUNLE, Kayode Feyisetan. Bio-Based Polymers for Technical Applications: A Review — Part 2. *Open Journal of Polymer Chemistry*, v. 04, n. 04, p. 95–101, 2014.
- AL-MAQDASI, Zainab *et al.* Characterization of wood and Graphene Nanoplatelets (GNPs) reinforced polymer composites. *Materials*, v. 13, n. 9, 2020.
- ALPÁR, Tibor; MARKÓ, Gábor; KOROKNAI, László. Natural fiber reinforced PLA composites: Effect of shape of fiber elements on properties of composites. *Handbook of Composites from Renewable Materials*, v. 2, p. 287-309, 2017.
- AYDEMIR, Deniz *et al.* Accelerated weathering and decay resistance of heat-treated wood reinforced polypropylene composites. *Drvna Industrija*, v. 70, n. 3, p. 279–285, 2019.
- BARBOS, Josiane Dantas Viana *et al.* Development and characterization of WPCs produced with high amount of wood residue. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 5, p. 9684–9690, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.073>>.
- BARCZEWSKI, Mateusz *et al.* Polyethylene green composites modified with post agricultural waste filler: thermo-mechanical and damping properties. *Composite Interfaces*, v. 25, n. 4, p. 287–299, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09276440.2018.1399713>>.
- BARTON-PUDLIK, Joanna; CZAJA, Krystyna. Fast-growing willow (*Salix viminalis*) as a filler in polyethylene composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 143, p. 68–74, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.031>>.
- BASALP, Dildare *et al.* Utilization of Municipal Plastic and Wood Waste in Industrial Manufacturing of Wood Plastic Composites. *Waste and Biomass Valorization*, v. 11, n. 10, p. 5419–5430, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12649-020-00986-7>>.
- BOCHKOV, I. *et al.* Polypropylene composites wear resistance properties due to spelt and oat grain husks short fiber preparation technology. *Proceedings of 10th International Scientific Conference BALTRIB 2019*, n. November, p. 1–6, 2019.
- BOFF, Leonardo. *Sustentabilidade: O Que É, O Que Não É*. 5ª ed. Petrópolis RJ: Editora Vozes

Limitada, 2016.

BOUHAMED, Nesrine *et al.* Ultrasound evaluation of the mechanical properties as an investigation tool for the wood-polymer composites including olive wood flour. *Mechanics of Materials*, v. 148, n. June 2019, p. 103445, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103445>>.

BÜTÜN, F. Yağmur *et al.* Recovering fibres from fibreboards for wood polymer composites production. *International Wood Products Journal*, v. 9, n. 2, p. 42–49, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/20426445.2018.1462965>>.

BÜTÜN, Fahriye Yağmur *et al.* The effect of fibreboard (MDF) disintegration technique on wood polymer composites (WPC) produced with recovered wood particles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 118, n. January, p. 312–316, 2019.

CABRAL, Stênio Cavalier *et al.* Características comparativas da madeira plástica com a madeira convencional. *Revista Científica Vozes dos Vales*, v. 10, n. 5, p. 1–20, 2016.

DE LIMA, Lety Del Pilar Fajardo Cabrera; RODRÍGUEZ, Cristian David Chamorro; HERNANDEZ, José Herminul Mina. Use of organic acids in bamboo fiber-reinforced polypropylene composites: Mechanical properties and interfacial morphology. *Polymers*, v. 13, n. 12, 2021.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução*. 10. ed. [S.l.]: LTC, 2020.

CARDARELLI, François. *Materials Handbook*. [S.l.: s.n.], 2000.

CHAN-HOM, Tanakit *et al.* Flame retardancy, antifungal efficacies, and physical–mechanical properties for wood/polymer composites containing zinc borate. *Fire and Materials*, 2016.

CHAN, Clement Matthew *et al.* Mechanical performance and long-term indoor stability of polyhydroxyalkanoate (PHA)-based wood plastic composites (WPCs) modified by non-reactive additives. *European Polymer Journal*, v. 98, n. November 2017, p. 337–346, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.11.041>>.

CHEN, Bo *et al.* Corncob residual reinforced polyethylene composites considering the biorefinery process and the enhancement of performance. *Journal of Cleaner Production*, v. 198, p. 452–462, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.080>>.

CHITRA, K. N. *et al.* Characterization of wood polymer composite and design of root trainer. *AIP Conference Proceedings*, v. 1943, 2018.

CHUN, Koay Seong *et al.* Wood plastic composites made from post-used polystyrene foam and agricultural waste. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, v. 32, n. 11, p. 1455–1466, 2019.

CLEMONS, Craig. Interfacing wood-plastic composites industries in the U.S., *Forest Products Journal*, v. 52, n. 6, p. 10–18, 2002. Disponível em: <<https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2002/clemo02b.pdf>>.

CLEMONS, Craig M.; IBACH, Rebecca E. Effects of processing method and moisture history on laboratory fungal resistance of wood-HDPE composites. *Forest Products Journal*, v. 54, n. 4, p. 50–57, 2004.

ELMUSHYAKHI, Abraham. Parametric characterization of nano-hybrid wood polymer composites using ANOVA and regression analysis. *Structures*, v. 29, n. November 2020, p. 652–662, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.069>>.

FAYZULLIN, I. Z. *et al.* Glass-filled wood-polymer composites based on polypropylene. *Key Engineering Materials*, v. 816 KEM, p. 197–201, 2019.

FERENHOF, Helio Aisenberg; FERNANDES, Roberto Fabiano. Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: método SFF. *Revista ACB*, v. 21, n. 3, p. 550–563, 2016.

- FORTINI, Annalisa; MAZZANTI, Valentina. Combined effect of water uptake and temperature on wood polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 135, n. 35, p. 1–9, 2018.
- FRĄCZ, Wiesław; JANOWSKI, Grzegorz. Determination of viscosity curve and PVT properties for wood-polymer composite. *Wood Research*, v. 63, n. 2, p. 321–334, 2018.
- FRĄCZ, Wiesław; JANOWSKI, Grzegorz. Predicting effect of fiber orientation on chosen strength properties of wood-polymer composites. *Composites Theory and Practice*, v. 19, n. 2, p. 56–63, 2019.
- FRIEDRICH, Daniel. Comparative study on artificial and natural weathering of wood-polymer compounds: A comprehensive literature review. *Case Studies in Construction Materials*, v. 9, p. e00196, 2018.
- FRIEDRICH, Daniel. Thermoplastic moulding of Wood-Polymer Composites (WPC): A review on physical and mechanical behaviour under hot-pressing technique. *Composite Structures*, v. 262, p. 113649, 2021.
- GARDNER, Douglas J.; HAN, Yousoo; WANG, Lu. Wood–Plastic composite technology. *Current Forestry Reports*, v. 1, n. 3, p. 139–150, 2015.
- GILL, Yasir Qayyum *et al.* Fabrication, Characterization, and Machining of Polypropylene/Wood Flour Composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, n. 0123456789, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13369-021-05768-4>>.
- GIRDIS, Jordan *et al.* Rethinking Timber: Investigation into the Use of Waste Macadamia Nut Shells for Additive Manufacturing. *Jom*, v. 69, n. 3, p. 575–579, 2017.
- GUMU, Beril Eker *et al.* Dynamical mechanical properties of polypropylene composites filled with olive pit particles. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 47, n. 4, p. 2551–2561, 2019.
- HARTMANN, Robert; KOCH, Michael. Wood chip plastic composite – a novel bio-based material with high mechanical properties. *Polimery*, v. 62, n. 7/8, p. 556–559, 2017.
- HEJNA, Aleksander *et al.* Recent advances in compatibilization strategies of wood-polymer composites by isocyanates. *Wood Science and Technology*, v. 54, n. 5, p. 1091-1119, 2020.
- HEJNA, Aleksander *et al.* Rotational molding of linear low-density polyethylene composites filled with wheat bran. *Polymers*, v. 12, n. 5, 2020.
- HEJNA, Aleksander; BARCZEWSKI, Mateusz; KOSMELA, Paulina; ANIŚKO, Joanna; *et al.* Mandarin Peel As an Auspicious Functional Filler for Polymer Composites. *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, v. 40, n. 1, p. 89–106, 2021.
- HEJNA, Aleksander; BARCZEWSKI, Mateusz; KOSMELA, Paulina; MYSIUKIEWICZ, Olga; *et al.* Coffee silverskin as a multifunctional waste filler for high-density polyethylene green composites. *Journal of Composites Science*, v. 5, n. 2, p. 1–13, 2021.
- HEJNA, Aleksander; KOROL, Jerzy; *et al.* By-products from food industry as a promising alternative for the conventional fillers for wood–polymer composites. *Polymers*, v. 13, n. 6, 2021.
- HEJNA, Aleksander; KOSMELA, Paulina. Insights into compatibilization of poly( $\epsilon$ -caprolactone)-based biocomposites with diisocyanates as modifiers of cellulose fillers. *Mindanao Journal of Science and Technology*, v. 18, n. 1, p. 221–241, 2020.
- HUANG, Runzhou *et al.* Properties of core-half wrapped shell structure wood-polymer composites containing glass fiber-reinforced shells. *BioResources*, v. 15, n. 4, p. 9088–9102, 2020.
- HUANG, Runzhou; ZHANG, Xian; ZHOU, Chengjun. Mechanical, flammable, and thermal performances of co-extruded wood polymer composites with core–shell structure containing barite-filled shells. *Wood Science and Technology*. [S.l.: s.n.], 2020
- HUANG, Yanping *et al.* A branched polyelectrolyte complex enables efficient flame retardant and

excellent robustness for wood/polymer composites. *Polymers*, v. 12, n. 11, p. 1–13, 2020.

JAUNSLAVIETIS, Jevgenijs *et al.* Effect of the acidic treatment of domestic wood residue on biocomposite wettability and moisture sorption properties. *Vide. Tehnologija. Resursi - Environment, Technology, Resources*, v. 1, p. 129–133, 2017.

JAUNSLAVIETIS, Jevgenijs *et al.* The influence of mechanical and mechanochemical activation of hardwood wood waste on biocomposite properties. *Key Engineering Materials*, v. 800 KEM, p. 200–204, 2019.

JAWAID, Mohammad; THARIQ, Mohamed. *Sustainable Composites for Aerospace Applications*. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2018.

JIANG, Jun *et al.* How does pickering emulsion pre-treatment influence the properties of wood flour and its composites with high-density polyethylene? *Polymers*. [S.l.: s.n.]. , 2019

JIANG, Jun *et al.* Improved mechanical properties and hydrophobicity on wood flour reinforced composites: Incorporation of silica/montmorillonite nanoparticles in polymers. *Polymer Composites*. [S.l.: s.n.]. , 2020

JUBINVILLE, Dylan *et al.* A comprehensive review of global production and recycling methods of polyolefin (PO) based products and their post-recycling applications. *Sustainable materials and technologies*, v. 25, p. e00188, 2020.

JUBINVILLE, Dylan *et al.* Thermo-mechanical recycling of polypropylene for the facile and scalable fabrication of highly loaded wood plastic composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 219, n. January, p. 108873, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108873>>.

KALALI, Ehsan N. *et al.* Flame-retardant wood polymer composites (WPCs) as potential fire safe bio-based materials for building products: Preparation, flammability and mechanical properties. *Fire Safety Journal*, v. 107, n. January 2017, p. 210–216, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.11.001>>.

KALE, Amey *et al.* Lantana Fiber-Filled Polypropylene Composite. *Wood is Good: Current Trends and Future Prospects in Wood Utilization*, p. 1–480, 2017.

KAZA, S. *et al.* *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. [S.l.]: World Bank Publications, 2018. v. 1999.

KHAN, Mohammad Z.R.; SRIVASTAVA, Sunil Kumar; GUPTA, M. K. A state-of-the-art review on particulate wood polymer composites: Processing, properties and applications. *Polymer Testing*, v. 89, n. May, p. 106721, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106721>>.

KHAN, Mohammad Z.R.; SRIVASTAVA, Sunil Kumar; GUPTA, M. K. Enhancement of the properties of hybrid woods polymer composites by chemical pre-treatments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, v. 235, n. 4, p. 828–841, 2021.

KIELING, Antonio Claudio; SANTANA, Genilson Pereira; DOS SANTOS, Maria Cristina. COMPOSITOS DE MADEIRA PLÁSTICA : CONSIDERAÇÕES GERAIS. *Scientia Amazonia*, v. 8, n. December, 2019.

KLYOSOV, Anatole A. *Wood-Plastic Composites*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. v. 53.

KRAUSE, K. C. *et al.* Enhanced water resistance of extruded wood–polypropylene composites based on alternative wood sources. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 75, n. 1, p. 125–134, 2017.

KRAUSE, Kim Christian *et al.* Utilization of recycled material sources for wood-polypropylene composites: Effect on internal composite structure, particle characteristics and physico-mechanical properties. *Fibers*, v. 6, n. 4, p. 1–18, 2018.

- KUMAR, Vikram *et al.* Effect of gamma irradiation on tensile and thermal properties of poplar wood flour-linear low density polyethylene composites. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 174, n. April, p. 108922, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108922>>.
- LAHTELA, Ville; KÄRKI, Timo. *A study on the effect of construction and demolition waste (CDW) plastic fractions on the moisture and resistance to indentation of wood-polymer composites (WPC)*. *Journal of Composites Science*. [S.l.: s.n.], 2021
- LAZRAK, Charaf *et al.* Structural study of maritime pine wood and recycled high-density polyethylene (HDPEr) plastic composite using Infrared-ATR spectroscopy, X-ray diffraction, SEM and contact angle measurements. *Case Studies in Construction Materials*, v. 10, p. e00227, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00227>>.
- LOURENÇON, Tainise V. *et al.* Thermal Stabilization of Wood/Polypropylene Composites Through Addition of Unmodified, Low-Cost Kraft Lignin. *Waste and Biomass Valorization*, v. 11, n. 4, p. 1555–1563, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12649-018-0484-6>>.
- LUBIS, A. M.H.S. *et al.* Mechanical properties of oil palm frond wood filled thermoplastic polyurethane. *International Journal of Nanoelectronics and Materials*, v. 13, n. Special Issue ISSTE2019, p. 255–266, 2020.
- MANDAL, Moon *et al.* Development of wood polymer composites with thermosetting resin from soybean oil cross-linked with rosin derivative. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 78, n. 6, p. 1265–1278, 2020a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00107-020-01564-3>>.
- MANDAL, Moon *et al.* Property enhancement and DFT study of wood polymer composites using rosin derivatives as co-monomers. *New Journal of Chemistry*, v. 42, n. 3, p. 2260–2269, 2018.
- MANDAL, Moon *et al.* Study of UV stability, biodegradability and physical properties of rosin derivative cross-linked wood polymer composites. *International Wood Products Journal*, v. 11, n. 1, p. 2–11, 2020b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/20426445.2019.1706136>>.
- MANDAL, Moon; MAJI, Tarun K. Comparative study on the properties of wood polymer composites based on different modified soybean oils. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, v. 37, n. 2, p. 124–135, 2017.
- MANDAL, Moon; NATH, Deepankar; MAJI, Tarun Kumar. Wood polymer nanocomposites from functionalized soybean oil and nanoclay. *Wood Science and Technology*, v. 52, n. 6, p. 1621–1643, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00226-018-1043-9>>.
- MARTIKKA, Ossi; KÄRKI, Timo. Promoting recycling of mixed waste polymers in wood-polymer composites using compatibilizers. *Recycling*, v. 4, n. 1, p. 1–15, 2019.
- MATSEEVICH, Tatyana; ASKADSKII, Andrey; KONDRASHCHENKO, Valeriy. Modification of WPC Materials by Introduction of Dioctyl Phthalate Plasticator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 661, n. 1, 2019.
- MATSEEVICH, Tatyana; MATSEEVICH, Andrey; ASKADSKII, Andrey. Water absorption of wood-polymer composites of savewood. *E3S Web of Conferences*, v. 97, p. 0–6, 2019.
- MAZZANTI, V. *et al.* Hygrothermal degradation effects on a rubber toughened WPC. *Materials Today: Proceedings*, v. 31, n. xxxx, p. S209–S212, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.062>>.
- MAZZANTI, V.; MOLLICA, F. Bending Properties of Wood Flour Filled Polyethylene in Wet Environment. *Procedia Engineering*, v. 200, p. 68–72, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.011>>.
- MAZZANTI, Valentina *et al.* Correlation between Mechanical Properties and Processing Conditions in Rubber-Toughened Wood Polymer Composites. 2020.

- MICHALSKA-POZOGA, Iwona; WĘGRZYK, Sebastian; RYDZKOWSKI, Tomasz. *Assessment of influence of extrusion method on selected properties of wood-polymer composites using Taguchi method of experiment planning*. *Polimery*. [S.l.: s.n.], 2017
- MIRSKI, Radosław; DZIURKA, Dorota; BANASZAK, Aleksandra. Using rape particles in the production of polymer and lignocellulose boards. *BioResources*, v. 14, n. 3, p. 6736–6746, 2019.
- MOHAMED, Mostafa R. *et al.* Surface activation of wood plastic composites (WPC) for enhanced adhesion with epoxy coating. *Materials Performance and Characterization*, v. 8, n. 1, p. 22–40, 2019.
- MOHAMMED, Abubakar Sadiq; MEINCKEN, Martina. Properties of low-cost WPCs made from alien invasive trees and rLDPE for interior use in social housing. *Polymers*, v. 13, n. 15, 2021.
- MYSIUKIEWICZ, Olga *et al.* Frictional properties of  $\alpha$ -nucleated polypropylene-based composites filled with wood flour. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, v. 4, p. 461–472, 2019.
- NAGAMADHU, M.; KUMAR, G. C.Mohan; JEYARAJ, P. Effect of stacking sequence on mechanical properties neem wood veneer plastic composites. *AIP Conference Proceedings*, v. 1943, 2018.
- PATEL, Vinay Kumar; RAWAT, Neelam. Physico-mechanical properties of sustainable Sagwan-Teak Wood Flour/Polyester Composites with/without gum rosin. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 13, p. 1–8, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2017.05.002>>.
- PEERBOOMS, Wouter; PICKERING, Kim L. Use of recycled pulped chromated copper arsenate-treated wood fibre in polymer composites. *Journal of Composites Science*, v. 2, n. 2, p. 1–10, 2018.
- PETINAKIS, Eustathios; YU, Long; SIMON, George. Natural Fibre Bio-Composites Incorporating Poly ( Lactic Acid ). *Fiber reinforced polymers-The technology applied for concrete repair*, p. 41–59, 2013.
- PICKERING, K. L.; ARUAN EFENDY, M. G. Preparation and mechanical properties of novel bio-composite made of dynamically sheet formed discontinuous harakeke and hemp fibre mat reinforced PLA composites for structural applications. *Industrial Crops and Products*, v. 84, p. 139–150, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.005>>.
- PORTELA JUNIOR, Adauto de Brito *et al.* A MADEIRA PLÁSTICA E SEUS EFEITOS E VANTAGENS PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. 2019, [S.l.: s.n.], 2019. p. 10–12.
- PRAPRUDDIVONGS, Chana; SOMBATSOMPOP, Narongrit. Wood, silver-substituted zeolite and triclosan as biodegradation controllers and antibacterial agents for poly(lactic acid) (PLA) and PLA composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, v. 30, n. 5, p. 583–598, 2017.
- QUITADAMO, Alessia; MASSARDIER, Valérie; VALENTE, Marco. Interactions between PLA, PE and wood flour: Effects of compatibilizing agents and ionic liquids. *Holzforschung*, v. 72, n. 8, p. 691–700, 2018.
- RAGAERT, Kim; DELVA, Laurens; VAN GEEM, Kevin. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, v. 69, p. 24–58, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>>.
- RATHNAM, Vamsi *et al.* Influence of organically modified nanoclay and TiO<sub>2</sub> nanopowder on the properties of Azadirachta indica wood flour-reinforced high-density polyethylene, low-density polyethylene, polypropylene, and polyvinyl chloride nanocomposite. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2020.
- RATHOD, Yogita *et al.* Elaboration of performance of tea dust–polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 134, n. 17, p. 1–9, 2017.
- RENNECKAR, Scott *et al.* Compositional analysis of thermoplastic wood composites by TGA. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 93, n. 3, p. 1484–1492, 2004.

- ROWELL, Roger M. *Wood Chemistry and Wood Composites*. 1st Editio ed. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- SABA, Naheed *et al.* Recent advances in epoxy resin, natural fiber-reinforced epoxy composites and their applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 35, n. 6, p. 447–470, 2016.
- SAMUILOVA, E.O. *et al.* Tensile properties of wood plastic composites based on plant- filled polyvinyl chloride/poly(3-hydroxybutyrate-co-3- hydroxyhexanoate) matrices. *Agronomy Research*, v. 18, 2020. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10492/5659>>.
- SHOJAIE, Mohammad Hamed *et al.* Effect of gamma-ray and melt flow index of polypropylene on the properties of the lignocellulosic composite. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 177, n. May, p. 109126, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109126>>.
- SHULGA, Galia *et al.* Aminated wood sanding dust as filler for recycled polypropylene-based composite. *Cellulose Chemistry and Technology*, v. 53, n. 9, p. 945–953, 2019.
- SIWEK, Sebastian *et al.* Influence of different wood flour fractions on the mechanical properties of injection molded WPC with cellulose propionate. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 76, n. 2, p. 499–507, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00107-017-1265-9>>.
- SOUZA, R.R. *et al.* 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 2014, [S.l: s.n.], 2014. p. 6646–6652. Disponível em: <<http://www.metallum.com.br/21cbecimat/CD/PDF/104-010.pdf>>.
- SOZEN, Eser; AYDEMIR, Deniz; ZOR, Mustafa. The effects of lignocellulosic fillers on mechanical, morphological and thermal properties of wood polymer composites. *Drvna Industrija*, v. 68, n. 3, p. 195–204, 2017.
- SOZEN, Eser; ZOR, Mustafa; AYDEMIR, Deniz. The Effect of Nano TiO<sub>2</sub> and Nano Boron Nitride on Mechanical, Morphological and Thermal Properties of WF/PP Composites. *Drvna Industrija*, v. 69, n. 1, p. 13–22, 2018.
- STADLMANN, Alexander *et al.* Interfacial adhesion and mechanical properties of wood-polymer hybrid composites prepared by injection molding. *Polymers*, v. 13, n. 17, 2021.
- TIAN, Shenghui *et al.* A comprehensive study on the accelerated weathering properties of polypropylene-wood composites with non-metallic materials of waste-printed circuit board powders. *Materials*. [S.l: s.n.], 2019
- TUNCEV, D. V.; SATTAROVA, Z. G.; GALIEV, I. M. Multi-layer wood-polymer composite. *Solid State Phenomena*, v. 265 SSP, p. 47–52, 2017.
- VOLFSON, S. I. *et al.* The physicomechanical and rheological characteristics of wood-polymer composites based on thermally and mechanically modified filler. *International Polymer Science and Technology*, v. 44, n. 2, p. 39–43, 2017.
- WANG, Chengqian; MEI, Jun; ZHANG, Long. High-added-value biomass-derived composites by chemically coupling post-consumer plastics with agricultural and forestry wastes. *Journal of Cleaner Production*, v. 284, n. xxxx, p. 124768, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124768>>.
- WANG, Suwei; XUE, Ping; JIA, Mingyin; TIAN, Jing; *et al.* Effect of polymer blends on the properties of foamed wood-polymer composites. *Materials*, v. 12, n. 12, 2019.
- WANG, Suwei; CHEN, Ke; *et al.* Effect of processing conditions on the microstructure of microcellular PP/WF composites prepared by the continuous extrusion molding technology. *Materials Research Express*, v. 7, n. 1, 2019.
- WANG, Suwei; XUE, Ping; JIA, Mingyin; CHEN, Ke. Extrusion foaming behavior of wood plastic composites based on PP/POE blends. *Materials Research Express*, v. 6, n. 11, 2019.

- WANG, Suwei *et al.* Research on the preparation and properties of foamed PP/wood flour composites. *Materials Research Express*, v. 7, n. 3, 2020.
- WANG, Yi. *Morphological Characterization of Wood Plastic Composite (WPC) with Advanced Imaging Tools: Developing Methodologies for Reliable Phase and Internal Damage Characterization*. 2007. 245 f. 2007. Disponível em: <[http://digilib.unila.ac.id/4949/15/BAB II.pdf](http://digilib.unila.ac.id/4949/15/BAB%20II.pdf)>.
- YADAV, Sumit Manohar; LUBIS, Muhammad Adly Rahandi; SIHAG, Kapil. A Comprehensive Review on Process and Technological Aspects of Wood- Plastic Composites. *Jurnal Sylva Lestari*, v. 9, n. May, p. 329–356, 2021.
- YAMAJI, Fábio Minoru; BONDUELLE, Arnaud. Utilização Da Serragem Na Produção De Compósitos Plástico-Madeira. *Floresta*, v. 34, n. 1, p. 59–66, 2004.
- YEH, Shu-Kai. Polypropylene-Based Wood-Plastic Composites Reinforced With Nanoclay. *PhD Dissertation*, 2007.
- ZAINI, A. S.Syah M. *et al.* Mechanical properties evaluation of extruded wood polymer composites. *AIP Conference Proceedings*, v. 1877, 2017.
- ZHANG, Hui Hui; CUI, Yihua; ZHANG, Zhidan. Chemical treatment of wood fiber and its reinforced unsaturated polyester composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, v. 19, n. 1, p. 18–24, 2013.
- ZHANG, Jingfa *et al.* Reinforcement of continuous fibers for extruded wood-flour/HDPE composites: Effects of fiber type and amount. *Construction and Building Materials*, v. 228, p. 116718, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116718>>.

# CAPÍTULO 3

---

Estudo do efeito da adição de resíduos de máscaras de polipropileno nas propriedades físicas e mecânicas de blendas poliméricas

### 3 CAPÍTULO 3 – ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE MÁSCARAS DE POLIPROPILENO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE BLENDA POLIMÉRICAS

#### Resumo

---

A pandemia ocasionada pela propagação do Coronavírus SARS-CoV-2 amplificou a produção de Tecido Não Tecido (TNT), cuja principal matéria-prima é o Polipropileno (PP), devido à urgente necessidade de produzir Equipamentos de Proteção Individual (EPI) para uso da ampla sociedade, em especial as máscaras descartáveis. Como consequência direta ao maior consumo e produção de EPI, houve o aumento na geração de resíduos deste tipo, bem como a intensificação dos problemas ambientais relacionados ao seu descarte. Neste contexto, o presente trabalho visa investigar as propriedades físico-mecânicas (tração, flexão e absorção de água) de blendas poliméricas compostas por Polipropileno Virgem (PPv) e Polipropileno Reciclado (PPr) - proveniente de máscaras de TNT pós-consumo; de modo a compreender os efeitos da utilização do material reciclado nas propriedades das blendas produzidas. Neste intuito, as máscaras coletadas passaram por etapas de higienização, separação, processamento para adequação de suas propriedades (partículas secas e com tamanho  $\leq 1,75$  mm). Foram investigadas diferentes dosagens de PPr incorporado ao PPv (0, 25, 50, 75 e 100%). Os corpos de prova foram produzidos mediante processos de extrusão, peletização e moldagem por compressão a quente. Os resultados obtidos mostram que quanto maior a concentração de PPr na blenda, mais frágil ela se torna. O PPr reduziu sua resistência mecânica à medida que aumentou sua rigidez. Entretanto, ao utilizar 50% de material pós-consumo foi possível obter blendas com propriedades equivalentes à resina virgem, principalmente em relação a resistência à tração. Além disso, a incorporação de PPr às blendas representa uma inovadora alternativa para a reutilização das máscaras de TNT, produzidas e consumidas exaustivamente durante a pandemia em detrimento à sua disposição em aterros sanitários ou incineração.

**Palavras-chave:** Blenda Polimérica, Polipropileno, Tecido Não Tecido, Reaproveitamento de Resíduo, Pandemia de Covid-19.

---

### 3.1 Introdução

Durante a pandemia de Covid-19, à medida que a contaminação avançou e atingiu mais pessoas, pôde-se observar um aumento da procura por EPI. Dentre as necessidades levantadas, observou-se uma demanda crescente por aventais de procedimento e máscaras cirúrgicas (SOUZA, 2020; HOELZEL, 2021). O TNT é a principal matéria-prima dos EPI utilizados nos centros cirúrgicos, enfermarias e clínicas. Como são produtos descartáveis de uso único, é inevitável que haja um consumo elevado destes itens, principalmente das máscaras. A recomendação é utilizá-las apenas uma vez, por no máximo 8 horas de atividade (RAURELL-TORREDÀ *et al.*, 2020); o que favorece uma geração exacerbada de resíduos. O TNT é um material polimérico à base de PP, que devido à sua praticidade e baixo custo apresenta uma crescente demanda de utilização. Porém, seu uso indiscriminado e descarte inadequado representam sérios riscos ao meio ambiente, visto que sua decomposição pode levar centenas de anos (SCHEEREN *et al.*, 2020).

Uma possível estratégia para reaproveitar o TNT é aplicá-lo na produção de blendas poliméricas. Este termo é utilizado para descrever misturas de componentes poliméricos de forma que o segundo componente não é considerado aditivo, uma vez que sua concentração é significativa, superior a 2% em massa (NUNES *et al.*, 2002). As blendas poliméricas permitem combinar propriedades dos polímeros individuais e assim obter um material com novas características (SANTOS *et al.*, 2015). Além disso, são uma alternativa econômica para o desenvolvimento de novos materiais, quando comparadas à síntese de novos polímeros, cujo custo é mais elevado (AFINKO, 2019).

Ainda, as blendas permitem a revalorização de resíduos poliméricos. São encontrados na literatura estudos de misturas com frações recicladas, onde são amplamente discutidas as suas propriedades e principais aplicações (MATIAS *et al.*, 2020; VELÁSQUEZ *et al.*, 2019; LUNA *et al.* 2015; CHEN *et al.*, 2014). Geralmente, o polímero reciclado custa 40% a menos que o polímero virgem; assim, a substituição da parte virgem pela reciclada proporciona a redução de custo e aumento da competitividade, além de auxiliar na preservação ambiental (FERNANDES, 2007). Entretanto, Ohta *et al.* (2002), que estudaram a indústria automotiva sob o ponto de vista da reciclagem, demonstram que os polímeros, quando reciclados, apresentam propriedades mecânicas inferiores se comparados com metais, borrachas e outros tipos de materiais. Todavia,

ainda assim, existe uma crescente demanda de mercado destinada a estes materiais (HEMAIS, 2003).

O PP, matéria-prima do TNT, é um dos polímeros termoplásticos mais comercializados. Ele apresenta vantagens como baixo custo, reciclabilidade e alta estabilidade térmica e, portanto, produz muitos tipos de blendas (QIU *et al.*, 2003). Entretanto, assim como outros materiais poliméricos, a reciclagem do PP degrada suas propriedades mecânicas e térmicas devido às altas temperaturas envolvidas no processo (KIM *et al.*, 2007). Uma vasta gama de pesquisas envolvendo blendas poliméricas utiliza a mistura de PPv ou PPr com outros tipos de polímeros. Santos *et al.* (2013) estudaram o efeito da adição de PPr nas propriedades mecânicas e de escoamento de blendas de PP e Etileno-Propileno-Dieno (EPDM). O aumento do teor de polímeros reciclados na mistura levou ao aumento da resistência mecânica e do índice de fluidez do produto. Matias *et al.* (2020) analisaram a possibilidade de incorporar PP ou Polietileno Tereftalato (PET) reciclados na fabricação de tubos, com propriedades mecânicas competitivas em relação aos preparados com materiais virgens. Os resultados mostraram que a incorporação do PET reciclado melhorou significativamente as propriedades de flexão, quando comparado ao PPr.

Há também estudos sobre a caracterização e propriedades mecânicas de blendas com a mistura de ambos materiais, PPv e PPr (STOIAN *et al.*, 2019; BARBOSA *et al.*, 2017). Stoian *et al.* (2019) observaram um aumento de 20% na resistência à tração e módulo de elasticidade no caso da blenda com massa equivalente a 50% de PPv, comparada com o PPr puro. Por sua vez, os resultados obtidos por Barbosa *et al.* (2017) demonstraram propriedades de tração do PPv e do PPr semelhantes, bem como das misturas entre ambos. Em uma comparação direta entre os extremos, PPv e PPr puros, a mudança de valor foi de apenas 3,87% para a tração e de menos de 1% para o módulo de elasticidade. Alguns autores avaliaram ainda a possibilidade de produzir blendas sem a necessidade de polímeros virgens. É o caso de Araujo e Morales (2018), que alcançaram a compatibilização de uma blenda formada por PPr da indústria de plásticos e PET reciclado de garrafas pós-consumo; e Hubo *et al.* (2016) que propuseram uma mistura de poliolefinas mistas recicladas.

Diante do exposto, percebe-se a frequente utilização do PP como componente de blendas poliméricas, seja como material virgem ou reciclado. Entretanto, não foi constatada durante a revisão de literatura realizada, a incorporação de PPr advindo de resíduos de TNT. Sendo assim,

o objetivo deste trabalho é estudar os efeitos da adição de PPr proveniente da reciclagem de máscaras de TNT nas propriedades físicas e mecânicas de blendas poliméricas. E, para fins comparativos, foram produzidas amostras de controle compostas por PPv ou PPr.

## **3.2 Metodologia**

### **3.2.1 Matérias-primas e Procedimentos de moldagem das amostragens de controle e blendas**

Para o desenvolvimento das blendas poliméricas foram utilizados PPv e resíduo de TNT. O PPv foi fornecido pela Braskem, com índice de fluidez igual e 3,5 g/10 minutos e densidade de 0,905 g/cm<sup>3</sup> (BRASKEM, 2019). O TNT foi proveniente do descarte controlado de máscaras cirúrgicas. As máscaras, com gramatura de 0,0025 g/cm<sup>2</sup>, foram adquiridas novas e utilizadas por um período de 24h. Depois de descartadas, foram lavadas com água e detergente em uma máquina de lavar semiautomática Colormaq LCB, utilizando o programa de lavagem Delicado. As máscaras foram então embebidas em água com cloro a 0,1% durante um minuto e posteriormente enxaguadas para assegurar a sua descontaminação, e secas ao ar livre.

Após sua higienização, as máscaras passaram pelo processo de separação das partes não compostas por PP (elásticos, arames, etc.). O PPr advindo das máscaras de TNT foi previamente fragmentado em moinho de facas marca Marconi, modelo MA 580, acoplado com peneira de 1,75 mm. Misturas de PPr e PPv, com massa total de 100 g, foram processadas de acordo com as dosagens indicadas na Tabela 3.1. Para tanto, foi utilizada uma extrusora de laboratório, monorosca Thermo Scientific, modelo HAAKE PolyLab, com temperatura de 175 °C em todas as 3 zonas de aquecimento e velocidade do parafuso de 45 rpm. Após ser extrudado com diâmetro médio de 3,40 mm, o material foi peletizado em um Peletizador AXPlástico, Modelo AX Gran, em grãos de aproximadamente 3,70 mm de comprimento. Vale lembrar que as amostras 100PPv e 100PPr não configuram blendas; tratam-se de amostras de controle para fins comparativos, sendo compostas inteiramente por PPv e PPr, respectivamente.

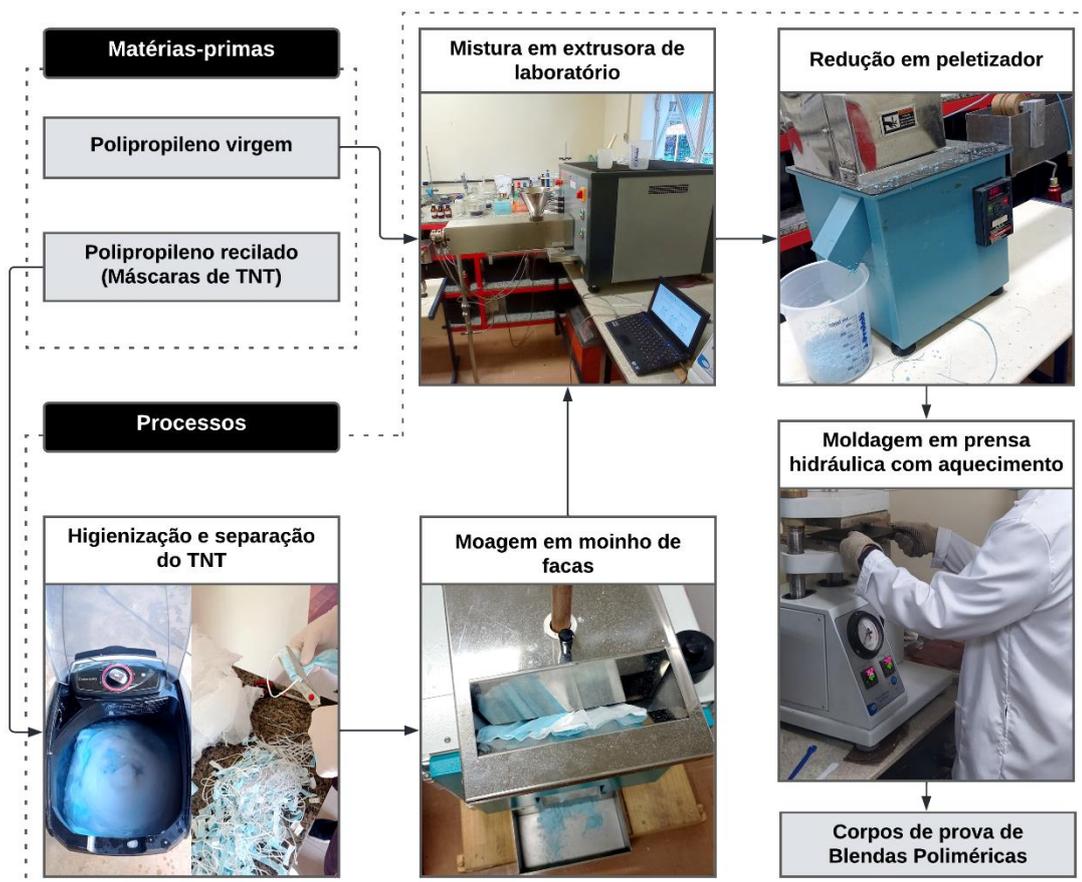
Os Corpos de Prova (CP) foram moldados, a partir dos grãos peletizados, por compressão a quente em prensa hidráulica com aquecimento, marca SOLAB, modelo SL11, em temperatura de 180°C e 5 toneladas de fechamento (aproximadamente 25 MPa) por um período de 5 minutos. Foram utilizadas duas chapas de compressão e um molde metálico para amostras, em forma de haltere, com as seguintes dimensões: comprimento da seção estreita de 57,0 mm; largura da seção estreita de 13,0 mm e espessura de 3,2 mm. Após a prensagem, os CP foram

deixados em repouso por 30 minutos, sob pressão igual à de moldagem, antes de serem desmoldados. A Figura 3.1 apresenta um fluxograma com as matérias-primas e processos envolvidos na produção dos CP de blendas e das amostras de controle.

**Tabela 3.1 – Dosagens das blendas poliméricas composta por PPv e PPr em porcentagem de massa.**

Amostra	PPv (%m)	PPr (%m)
100PPv	100	0
75PPv25PPr	75	25
50PPv50PPr	50	50
25PPv75PPr	25	75
100PPr	0	100

**Figura 3.1 – Matérias-primas; Higienização e separação do TNT; e produção dos CP de CMP**



Fonte: Elaborado pelo autor

### **3.2.2 Procedimentos de caracterização das amostragens de controle e blendas**

Os ensaios de tração foram realizados em Máquina Universal de ensaios Instron, modelo EMIC 23-20, com velocidade de separação das garras de 50 mm/min, de acordo com a norma D638 (ASTM, 2014), operada em temperatura ambiente (aproximadamente 23°C). Os resultados foram obtidos a partir da média aritmética de 6 CP ensaiados, com precisão de 0,1%. Foram avaliados os parâmetros de deformação à tração, módulo de elasticidade e máxima tensão à tração. Enquanto os ensaios de flexão foram realizados de acordo com a norma D790 (ASTM, 2007), também utilizando a Máquina Universal de ensaios Instron, modelo EMIC 23-20, com a determinação das propriedades de resistência à flexão, módulo de elasticidade e deformação sob flexão. Os resultados foram obtidos a partir da média aritmética de 6 CP ensaiados, com precisão de 0,1%. E, para a aferir o percentual de absorção de água das blendas, foram utilizados 6 CP de cada dosagem. Suas massas foram determinadas utilizando uma balança de precisão METTLER TOLEDO, modelo PG203-S. Após a pesagem, os CP foram submersos em água destilada mantida a uma temperatura de  $25 \pm 2$  °C. Decorridas 24 horas de imersão, os CP foram retirados e secos superficialmente para eliminação do excesso de água. Posteriormente foi realizada uma nova pesagem para determinar a massa das amostras saturadas. As condições de ensaio e fórmula de cálculo da água absorvida são indicadas na Norma NBR 9486 (ABNT, 2011).

## **3.3 Resultados e Discussões**

### **3.3.1 Amostras de controle e de blendas poliméricas**

Os CP de blendas poliméricas com diferentes dosagens de PPv e PPr, assim como os CP de PPv e PPr em separado utilizados como amostras de controle, são apresentados na Figura 3.2.

**Figura 3.2 – Amostras de controle e de blendas poliméricas com diferentes dosagens de PPv e PPr**



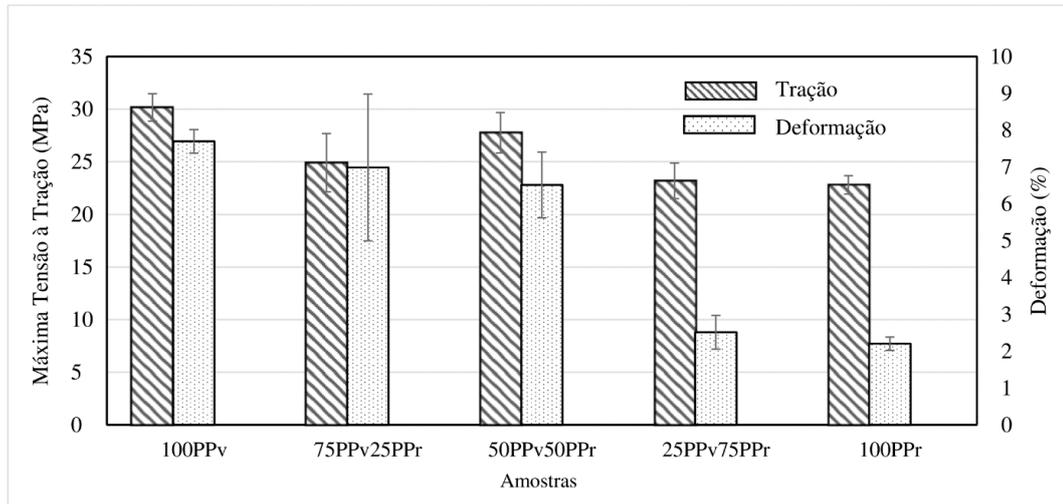
**Fonte: Elaborado pelo autor**

### **3.3.2 Caracterização físico-mecânica das amostragens de controle e blendas**

Os resultados de tensão e deformação na força máxima para o ensaio de tração uniaxial são apresentados na Figura 3.3. Todas as blendas apresentaram resistência maior que a amostra de controle composta inteiramente por PPr e menor que a amostra de controle composta inteiramente por PPv. Este comportamento era esperado devido à degradação das propriedades mecânicas do PPr quando exposto às altas temperaturas de processamento, o que reduz o desempenho mecânico das misturas com PPv. A amostra 75PPv25PPr, entretanto, não apresentou o comportamento previsto, ao alcançar resistência inferior à amostra 50PPv50PPr, mesmo contendo menor teor de material reciclado. Além disso, as deformações da amostra 75PPv25PPr se espalharam por uma ampla gama de valores (de 4 a 9%), o que é evidenciado pelo desvio padrão significativo alcançado. É possível que os pellets utilizados para a moldagens dos CP desta amostra tenham composição mais heterogênea devido ao processo de alimentação manual da extrusora, utilizando dois materiais diferentes. Desta forma, os rompimentos mediante maiores deformações podem ter ocorrido em áreas dos CP com alta concentração de PPv. Dentre as blendas, a amostra 50PPv50PPr apresentou a maior resistência média à tração: 27,8 MPa; apenas 8% menor que a amostra de controle de PPv, que alcançou 30,2 MPa; e 20% maior que a amostra 25PPv75PPr (23,2 MPa). A diferença de desempenho entre as duas amostras de controle foi de 7,4 MPa, o que corresponde a um decréscimo de 25% da resistência do PPr em relação à amostra de controle de PPv. Os CP com altas concentrações de PPr (75 e 100%) obtiveram menores deformações, conforme os valores médios do módulo de Young apresentados na Figura 3.4. À medida em que se aumentou o teor de PPr nas misturas,

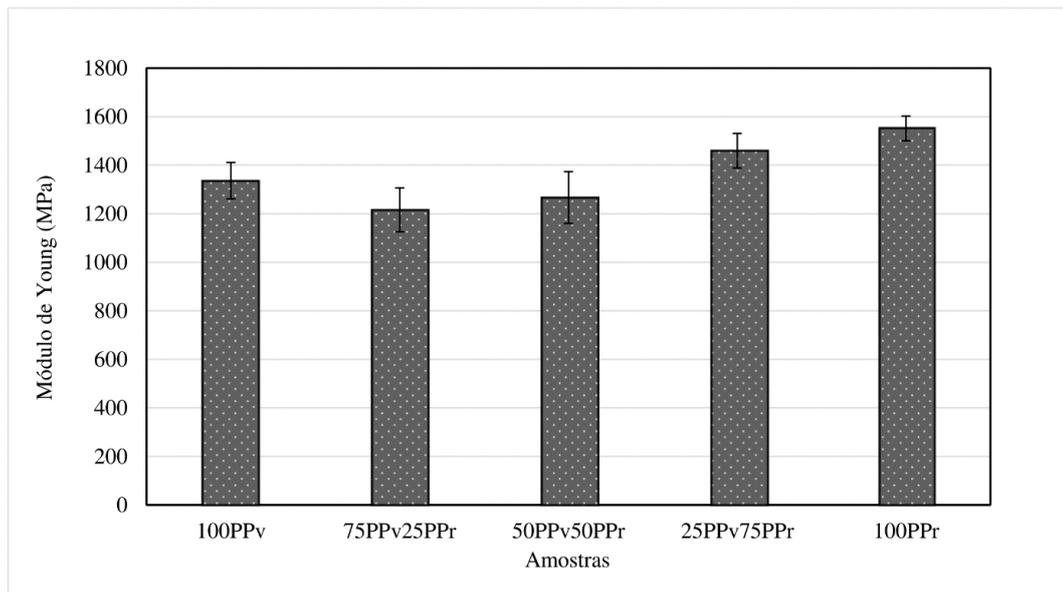
mais rígidas as amostras se tornaram. Ainda assim, somente as amostras com 75% e 100% de PPr superaram a rigidez do PPv, enquanto a amostra com 50% de PPr, ficou equiparada à amostra de controle citada.

**Figura 3.3 – Resistência à tração e deformação das amostragens de controle e blendas.**



**Fonte: Elaborado pelo autor**

**Figura 3.4 – Módulo de elasticidade na tração das amostragens de controle e blendas.**



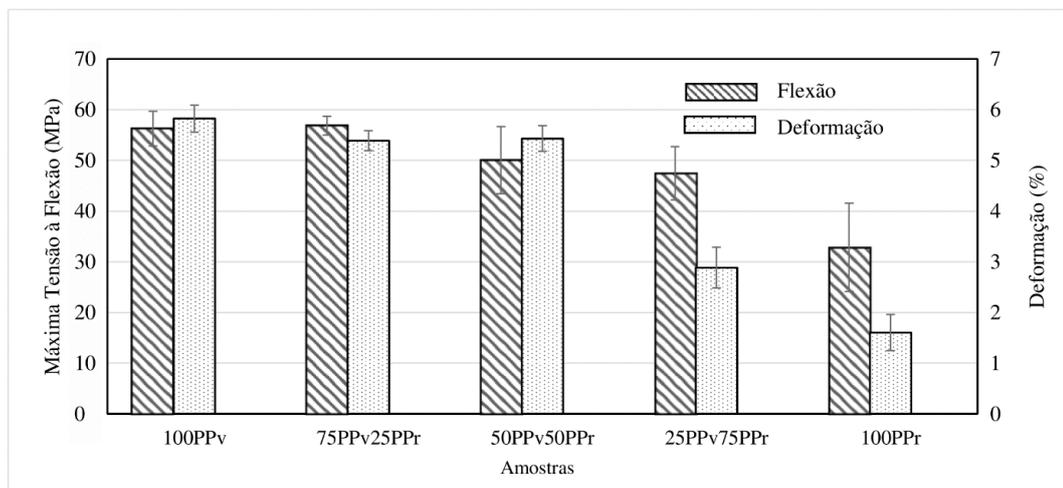
**Fonte: Elaborado pelo autor**

Ainda, tais resultados associados aos de composições semelhantes encontradas na literatura mostram que todas as blendas, produzidas via extrusão seguida por compressão a quente,

obtiveram resistência superior às confeccionadas por Barbosa *et al.* (2017), via injeção, misturando PPv com PPr fornecido por uma empresa de reciclagem de resíduos plásticos. Por outro lado, as mesmas blendas apresentaram resistência inferior às amostras produzidas por Raj *et al.* (2013), via extrusão seguida por injeção, utilizando misturas de PPv com PPr proveniente de um centro de coleta municipal. Desta forma, acredita-se que o tipo de processamento é um fator decisivo para o desempenho das blendas poliméricas com PPv, sendo este mais promissor quando o processo de extrusão é empregado em conjunto com outros processos, compressão ou injeção, como apresentado no Capítulo 2. Neste caso, a extrusão tem a função de homogeneizar os polímeros, produzindo um material mais fácil de ser trabalhado posteriormente (Raj *et al.*, 2013) e a compressão ou injeção a função de moldagem dos CP, sendo que a injeção gera produtos com melhores propriedades mecânicas, atribuídas à melhor compactação das amostras e à indução de uma orientação molecular nos CP (AGRAWAL *et al.*, 2006; MELLO, 2010).

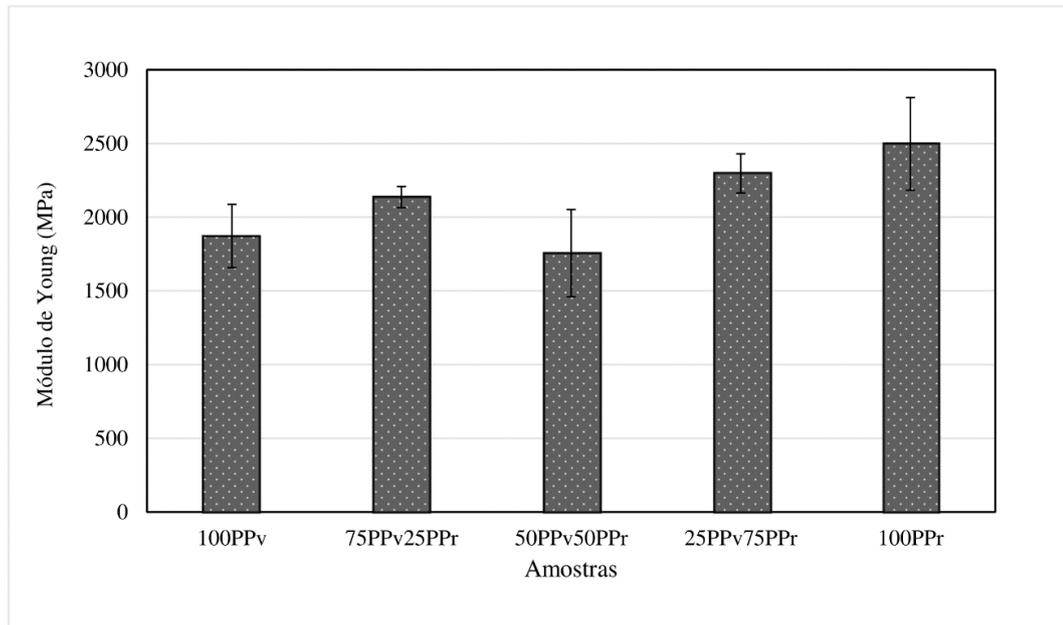
Na Figura 3.5 e 3.6 são apresentados, respectivamente, os resultados de tensão e deformação na força máxima para o ensaio de flexão e os valores médios do módulo de elasticidade na flexão.

**Figura 3.5 – Resistência à flexão e deformação das amostragens de controle e blendas.**



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 3.6 – Módulo de elasticidade na flexão das amostragens de controle e blendas.**



**Fonte: Elaborado pelo autor**

Assim como no ensaio de tração, a amostra 75PPv25PPr demonstrou um comportamento não esperado. Embora tenha apresentado resistência superior à amostra constituída por 50% de material reciclado (acrécimo de 13,6%), ela também demonstrou um aumento de rigidez quando comparada à esta última amostra, mesmo possuindo menor teor de material reciclado. E, considerando que o PPr possui uma característica frágil quando comparado ao PPv, com menor capacidade de deformação, sendo que seu alongamento na ruptura diminui drasticamente (NETO *et al.*, 2013), esperava-se um alto módulo de elasticidade somente nos CP com maior teor de PPr, como visto na amostra 25PPv75PPr e na amostra de controle 100PPr. A diferença entre as resistências à flexão das amostras com 50% e 75% de PPr foi mais sutil, quando comparada com à resistência à tração: apenas 5%. E, entre as amostras de controle de PPv e PPr, que alcançaram 53,6 MPa e 32,9 MPa, respectivamente, houve uma perda de 39% de resistência do material comercial para o reciclado.

Na Tabela 3.2 são apresentados os valores médios de absorção das amostras de controle e blendas após ficarem imersas durante 24h em água destilada.

**Tabela 3.2 – Valores médios de Absorção (%)**

<b>Formulação</b>	<b>Absorção (%)</b>
100PPv	0,013 0,009*
75PPv25PPr	0,012 0,020*
50PPv50PPr	0,014 0,012*
25PPv75PPr	0,014 0,017*
100PPr	0,037 0,026*

\* Valores do desvio padrão

Considerando que os materiais utilizados na composição das blendas são polímeros e sendo assim, possuem característica hidrofóbica, os resultados obtidos no teste de absorção realizados, se enquadram dentro do esperado. Todas as blendas, assim como a amostra de controle de PPv, apresentaram absorção próxima a 0,01%. Ainda que não seja um valor significativo, a amostra de controle de PPr apresentou absorção de 0,04% em massa, superior as blendas em que há presença de algum teor de resina virgem. O baixo teor de absorção em todos as amostragens, evidencia uma eficiência nas ligações entre PPv e PPr e conseqüente recobrimento das blendas, sem a presença de poros na superfície dos CP.

### **3.4 Conclusão**

Com o presente trabalho, analisou-se os efeitos da adição de PPr, proveniente de máscaras de TNT, com o PPv, para a confecção de blendas poliméricas. Por se tratarem do mesmo polímero (PP), embora um deles fosse pós-consumo, não houve dificuldades em proceder a mistura. Enquanto o PPv foi utilizado em forma de grãos, o PPr apresentou aspecto pulverulento após seu preparo e processamento. Acredita-se que isto não tenha afetado os resultados obtidos, visto que o TNT foi facilmente fundido, tendo o processo de fragmentação em moinho de facas sido escolhido para facilitar a etapa de extrusão, uma vez que o equipamento utilizado requer alimentação manual para materiais de baixa densidade, como o TNT.

Ainda que a amostra 75PPv25PPr tenha apresentado um comportamento diferente do esperado, as propriedades mecânicas observadas foram superiores à de outros estudos, cujo as blendas também foram produzidas a partir de PP comercial e reciclado. A inclusão do PPr,

proveniente das máscaras de TNT, nas blendas produzidas resultou em resistências à tração e flexão inferiores em relação ao PPv. Porém, a partir de 50% de PPr em massa, as blendas se mostraram tão quanto ou mais rígidas que o PPv, o que indica uma menor tendência à deformação. De acordo com a revisão de literatura realizada, foi possível perceber que não é comum a realização de ensaios de absorção em blendas de PP, sendo este tipo de análise mais utilizada nos casos em que são incorporados à matriz, cargas hidrofílicas, configurando compósitos poliméricos. Ainda assim, optou-se pela realização deste ensaio, de modo a avaliar a eficiência do processo de moldagem por extrusão seguida por compressão a quente, que propiciou a formação de blendas pouco porosas, o que ficou evidenciado pelos valores mínimos de absorção. Além disso, comprovou-se que, devido à propriedade hidrofóbica de ambas as partes da mistura, a blenda também não apresenta variação significativa do teor de umidade. Embora a amostra 75PPv25PPr tenha alcançado módulo de elasticidade e resistência à flexão superiores à amostra 50PPv50PPr, a segunda amostra se aproxima da primeira pelo desvio padrão, no que se refere à resistência à flexão; além de superá-la no que diz respeito ao comportamento na tração. Desta forma, recomenda-se para pesquisas futuras utilizar como referência a amostra 50PPv50PPr, que além de se equivar à amostra de controle de PPv, representa a substituição de metade de PP comercial por PP pós-consumo.

O aspecto visual obtido se deve ao pigmento azul utilizado em algumas das camadas de TNT que compunham as máscaras. Isso porque o EPI utilizado possuía 3 camadas de TNT, das quais a interna era branca e as outras azuis, o que explica as manchas que se acentuaram conforme o teor de material reciclado aumentou. Nos casos em que seja possível a separação dos materiais reciclados por cor, é possível a produção de blendas coloridas controladas exclusivamente pelo pigmento contido na matéria-prima reciclada, excluindo a necessidade de produtos para a pigmentação. Conclui-se que o PPr fragiliza o PPv, mas em contrapartida, possibilita sua substituição na produção de blendas poliméricas, de maneira que seja possível a destinação de forma ambientalmente mais adequada dos resíduos pandêmicos, como o TNT proveniente de máscaras descartáveis, utilizadas em abundância durante a pandemia, do que a deposição em aterros sanitários ou processos de incineração.

### 3.5 Referências Bibliográficas

- AFINKO. Blendas Poliméricas: O que são e como são classificadas? Afinko Soluções em Polímeros, 2019. Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/blendas-o-que-sao-e-como-sao-classificadas/>. Acesso em: 07 jun. 2022.
- AGRAWAL, Pankaj et al. 6. Efeito do Compatibilizante PPgAA e do IF da Fase Dispersa nas Propriedades Mecânicas e Morfologia das Blendas de PA6/PP Moldadas Por Compressão e Injeção. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 1, n. 1, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *D638 – 14: Standard test method for Tensile properties of plastics*. West Conshohocken, PA, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *D790-07: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. West Conshohocken, PA: Astm, 2007.
- ARAÚJO, Luciana Maria Guadagnini; MORALES, Ana Rita. Compatibilization of recycled polypropylene and recycled poly (ethylene terephthalate) blends with SEBS-g-MA. *Polímeros*, v. 28, p. 84-91, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 9486: Compensado – Determinação da absorção de água*. Rio de Janeiro, 2011.
- BARBOSA, L. Gustavo; PIAIA, Matheus; CENI, G. Henrique. Analysis of impact and tensile properties of recycled polypropylene. *International Journal of Materials Engineering*, v. 7, n. 6, p. 117-120, 2017.
- BRASKEM. Folha de dados - Polipropileno PG35L. Braskem, 2019. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/cms/Principal/ModuloProduto/DownloadFolhaDados?idFolha=HECYKKCesNg=&idIdioma=YrItVniimrc=&idTipo=YrItVniimrc=&idProduto=yN9iNvIyyt4=&pasta=T46EDfq+gkM=&guid=dcf901ab-82db-46e8-a1db-dd69fa08b458>. Acesso em: 30 jun. 2022.
- CHEN, Ruy Shan *et al.* Influence of blend composition and compatibilizer on mechanical and morphological properties of recycled HDPE/PET blends. *Materials Sciences and Applications*, v. 5, n. 13, p. 943, 2014.
- FERNANDES, Beatriz L.; DOMINGUES, Antonio J. Caracterização mecânica de polipropileno reciclado para a indústria automotiva. *Polímeros*, v. 17, p. 85-87, 2007. DOI: 10x1590:S0104-14282007000200005.
- HEMAIS, Carlos A. Polímeros e a indústria automobilística. *Polímeros*, v. 13, p. 107-114, 2003.
- HOELZEL, Carlos G. M.; RIBEIRO, Luana C. M. *Manual do projeto EPI - UFG* [Internet]. 2020. Goiânia: Cegraf UFG. 74 p. Disponível em: [https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/1/o/Manual\\_ficha\\_catalografica\\_final.pdf](https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/1/o/Manual_ficha_catalografica_final.pdf). Acesso em 08 out 2021.
- HUBO, Sara *et al.* Blending of recycled mixed polyolefins with recycled polypropylene: Effect on physical and mechanical properties. In: AIP Conference Proceedings. *AIP Publishing LLC*, 2016. p. 140006.
- KIM, Hee-Soo *et al.* The effect of types of maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) on the interfacial adhesion properties of bio-flour-filled polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 38, n. 6, p. 1473-1482, 2007.
- LUNA, Carlos Bruno Barreto *et al.* Desenvolvimento de blendas poliméricas visando a tenacificação dos polímeros: uma revisão. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 36, n. 1, p. 67-80, 2015.

- MATIAS, Áurea A. *et al.* Use of recycled polypropylene/poly (ethylene terephthalate) blends to manufacture water pipes: An industrial scale study. *Waste Management*, v. 101, p. 250-258, 2020.
- MELLO, Felipe Bier de. Blenda PP/HIPS: compatibilização, propriedades e processamento por rotomoldagem. 2010. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2010.
- NETO, B. R. L.; ABREU, F. O. M. S.; ASSUNÇÃO, H. G. L. Desenvolvimento de Blendas Poliméricas de Polipropileno reciclado com SBS para uso em componente automotivo. In: 12º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2013, Florianópolis. 12º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2013. v. único.
- NUNES, Luciano Rodrigues; RODOLFO JR., Antonio; ORMANJI, Wagner. Tecnologia do PVC. São Paulo: ProEditores / Braskem, 2002.
- OHTA, Hideo; TOHNO, Hiromi; URUJI, Tai. *Use of Recycled Plastic as Truck and Bus Component Material*. 2002.
- QIU, Wulin *et al.* Preparação e características de compósitos de celulose altamente cristalina com polipropileno: Efeitos do polipropileno maleado e do conteúdo de celulose. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 87, n. 2, pág. 337-345, 2003.
- RAJ, Mahendrasinh M. *et al.* Studies on mechanical properties of recycled polypropylene blended with virgin polypropylene. *International Journal of Science Innovations Today*, v. 2, n. 3, p. 194-203, 2013.
- RAURELL-TORREDÀ, Marta *et al.* Reflections arising from the COVID-19 pandemic. *Enfermería Intensiva* (English ed.), v. 31, n. 2, p. 90-93, 2020.
- SANTOS, Cayane Genro *et al.* Uso de blendas poliméricas em nano e microencapsulação. *Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas*, v. 16, n. 2, p. 311-323, 2015.
- SANTOS, Luciene da S. *et al.* Estudo do efeito da adição de PP reciclado nas propriedades mecânicas e de escoamento de misturas de PP/EPDM. *Polímeros*, v. 23, p. 389-394, 2013.
- SCHEEREN, Denise; MÄHLMANN, Cláudia Mendes; MÜLLER, Franciélli. 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.
- SOUZA, Diego de Oliveira. *A saúde dos trabalhadores e a pandemia de COVID-19: da revisão à crítica*. *Vigilância Sanitária em Debate: Sociedade, Ciência & Tecnologia*, v. 8, n. 3, p. 125-131, 2020. DOI: 10.22239/2317-269x.01627. Disponível em: <https://visaemdebate.incqs.fiocruz.br/index.php/visaemdebate/article/view/1627/1157>. Acesso em: 08 out. 2021.
- STOIAN, Sergiu Alexandru *et al.* Recycled polypropylene with improved thermal stability and melt processability. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 138, n. 4, p. 2469-2480, 2019.

# CAPÍTULO 4

---

Aplicabilidade de resíduos de papelão ondulado como carga de Compósitos Madeira-Plástico para a construção civil

## 4 CAPÍTULO 4 – APLICABILIDADE DE RESÍDUOS DE PAPELÃO ONDULADO COMO CARGA DE COMPÓSITOS MADEIRA-PLÁSTICO PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

### Resumo

---

A pandemia de Covid-19 desencadeou um aumento na produção de papelão ondulado para atender à nova demanda de embalagens devido à intensificação do e-commerce e pedidos de delivery. Nesse contexto, este trabalho visa avaliar a aplicabilidade dos resíduos de papelão como carga de enchimento na produção de compósitos madeira-plástico à base de polipropileno, visando a sua possível aplicação na construção civil; e como forma de minimizar os impactos ambientais associados ao aumento na geração de resíduos deste material e à exploração de madeiras naturais. Corpos de prova dos compósitos, produzidos com diferentes teores de papelão por meio dos processos de extrusão, peletização e compressão a quente foram submetidos a ensaios físicos (absorção e inchamento) e mecânicos (tração e flexão) normatizados. O papelão reciclado possibilitou um teor máximo de carga de 20%, em massa, e elevou a rigidez dos compósitos, comparados ao polipropileno virgem, demonstrando menor tendência à deformação. No que diz respeito à um equilíbrio entre propriedades alcançadas e reaproveitamento de resíduos, a amostra com 10% de papelão se apresentou como uma das mais promissoras. O aspecto visual alcançado remete à madeira natural, o que valoriza o material e facilita sua aceitação no mercado como substituto das espécies arbóreas.

**Palavras-chave:** Compósito Madeira-Plástico, Material de Construção Sustentável, Polipropileno, Papelão Ondulado, Reaproveitamento de Resíduos.

---

*Artigo aceito pelo 4º Congresso Luso-Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis, que ocorrerá em Salvador-BA, de 9 a 11 de novembro de 2022*

#### 4.1 Introdução

A Pandemia de Covid-19 impulsionou novos hábitos de consumo. Estudos mostram que 61% dos consumidores que compraram online durante a quarentena, aumentaram o volume de compras devido ao isolamento social (REDAÇÃO E-COMMERCE BRASIL, 2020). Com a maior permanência das pessoas em casa e comprando mais produtos pela internet, a demanda por embalagens aumentou. Segundo a Associação Brasileira do Papelão Ondulado (ABPO), no terceiro trimestre de 2020 as vendas de chapas de papelão aumentaram 15,4% em relação ao mesmo período do ano anterior (MELLO, 2020). Entretanto, a reciclagem não conseguiu acompanhar o aumento da produção e coleta deste material pós-consumo devido à interrupção das atividades das cooperativas de reciclagem durante alguns períodos da quarentena (FRANÇA, 2020).

Uma possível estratégia de reaproveitamento do papelão ondulado é sua incorporação na produção de Compósitos Madeira-Plástico (CMP), em substituição a madeira natural. Os compósitos poliméricos, como é o caso dos CMP, são formados por pelo menos duas fases ou componentes diferentes, geralmente uma matriz polimérica e outra fase de reforço orgânica ou inorgânica (BRASKEM, 2016). A ideia principal dos compósitos é que seus dois ou mais componentes, com propriedades diferentes, produzam juntos um material com a combinação dessas propriedades (SPADETTI *et al.*, 2017). Embora sejam mais densos, quando comparados à madeira natural, os CMP apresentam vantagens associadas à maior resistência a pragas, fungos e intempéries; requerem menos manutenção; pouco deformam, encolhem ou expandem; além da possibilidade de serem compostos inteiramente por materiais reciclados (RIZVI; SEMERALUL, 2008).

A construção civil abrange alguns dos componentes mais importantes para a aplicação de CMP, como em decks, tapumes e hastes para cercas (CARUS *et al.*, 2015). Além disso, os CMP podem ser aplicados em revestimentos, perfilados, painéis ornamentais, pavimentos, portas, entre outros (JUBINVILLE *et al.*, 2021). O atributo de moldagem dos polímeros expande as áreas de aplicação do CMP em perfis de diferentes formatos. Estes formatos vão de materiais de construção retilíneos até formas orgânicas que podem ser utilizados tanto em ambientes internos, quanto externos (BASALP *et al.*, 2020).

Estudos encontrados na literatura indicam que diversos materiais podem ser utilizados para a produção de CMP, com destaque para a serragem de madeira incorporada a termoplásticos

recicláveis, como salienta a revisão elaborada por Kieling, Pereira e Dos Santos (2019). Dentre os polímeros termoplásticos, o Polipropileno (PP) aparece em evidência. O PP é um dos principais polímeros existentes no mercado, caracterizado por sua baixa densidade e equilíbrio de propriedades térmicas, químicas e elétricas (NASCIMENTO *et al.*, 2018). Além disso, o PP é extremamente versátil e compatível com várias técnicas de processamento, o que incentiva sua aplicação em diversos bens de consumo e industriais, tornando-o quase sempre presente em nosso cotidiano (MALPASS e BAND, 2012).

Materiais lignocelulósicos e fibras celulósicas são comumente utilizados como material de reforço de CMP. O principal problema encontrado em compósitos reforçados com esses materiais é a incompatibilidade inerente entre as fibras vegetais, por serem hidrofílicas, enquanto a matriz polimérica é hidrofóbica (ZULKIFLI *et al.*, 2015). Ressalta-se que, os aspectos correlatos à adesão entre os constituintes de um compósito podem ser determinados pela ligação química de seus elementos; a adesão mecânica dada pelo preenchimento do polímero em relação a fibra; a adsorção e molhamento, associados à remoção do ar e cobertura das protuberâncias da fibra que não ocorre quando há camadas de água na superfície de fibras hidrofílicas; e pela atração eletrostática, que ocorre quando duas superfícies possuem cargas elétricas opostas (YAMAJI, 2004). Estudos recentes mostram que os materiais utilizados como carga de enchimento são os mais diversos possíveis, como por exemplo a farinha de Abeto branco (MAZZANTI *et al.*, 2020), farinha de Camará (KALE *et al.*, 2017), MDF Moído (KRAUSE *et al.*, 2018), casca de arroz (ESKANDER; TAWFIK; TAWFIC, 2018), painéis de fibras industriais reciclados (BÜTÜN *et al.*, 2018), negro de fumo (REIS *et al.*, 2013), entre outros. Não foi constatada, entretanto, a incorporação de papelão ondulado, um lignocelulósico processado, como carga de enchimento de compósitos poliméricos. Sendo assim, o presente trabalho visa avaliar a aplicabilidade dos resíduos de papelão como carga de enchimento na produção de CMP à base de PP, visando a sua possível aplicação na construção civil.

## **4.2 Metodologia**

### **4.2.1 Matérias-primas e procedimentos de moldagem dos CMP**

As matérias-primas utilizadas para o desenvolvimento dos compósitos foram Polipropileno virgem (PPv) e Papelão Ondulado reciclado (POr). O PPv utilizado foi fornecido pela Braskem, enquanto o POr foi doado por uma empresa de coleta e separação de materiais recicláveis em

Ouro Preto – MG (Brasil). As amostras de POr foram fragmentadas manualmente e por moinho de facas (MA 580, Marconi), peneiradas (< 1,75 mm) e secas em estufa, por 24 h a 105 °C, para eliminar a umidade, como indica a NBR14257 (ABNT, 1998). Depois, a farinha de POr foi armazenada em sacos plásticos hermeticamente fechados.

Misturas de PPv e farinha de POr, com massa total de 100g, produzidas com diferentes teores de papelão (5, 10, 15 e 20%), assim como a amostra de controle composta inteiramente de PPv, foram processadas de acordo com as formulações indicadas na Tabela 4.1. Para tal, foi utilizada uma extrusora monorosca de laboratório (Thermo Scientific, HAAKE PolyLab), com temperatura de 175°C em todas as 3 zonas de aquecimento e velocidade do parafuso de 45 rpm. Após ser extrudado com diâmetro médio de 3,40 mm, o material foi reduzido em Peletizador (AX Gran, AXPlástico) resultando em grãos de aproximadamente 3,70 mm de comprimento. Não foi possível produzir, nas mesmas condições de processamento, traços contendo teores de papelão maiores do que 20% devido às limitações técnicas da extrusora. Ademais, os testes preliminares mostraram que em formulações com teor de POr maiores do que 20%, a matriz polimérica não foi capaz de recobrir toda a carga de enchimento.

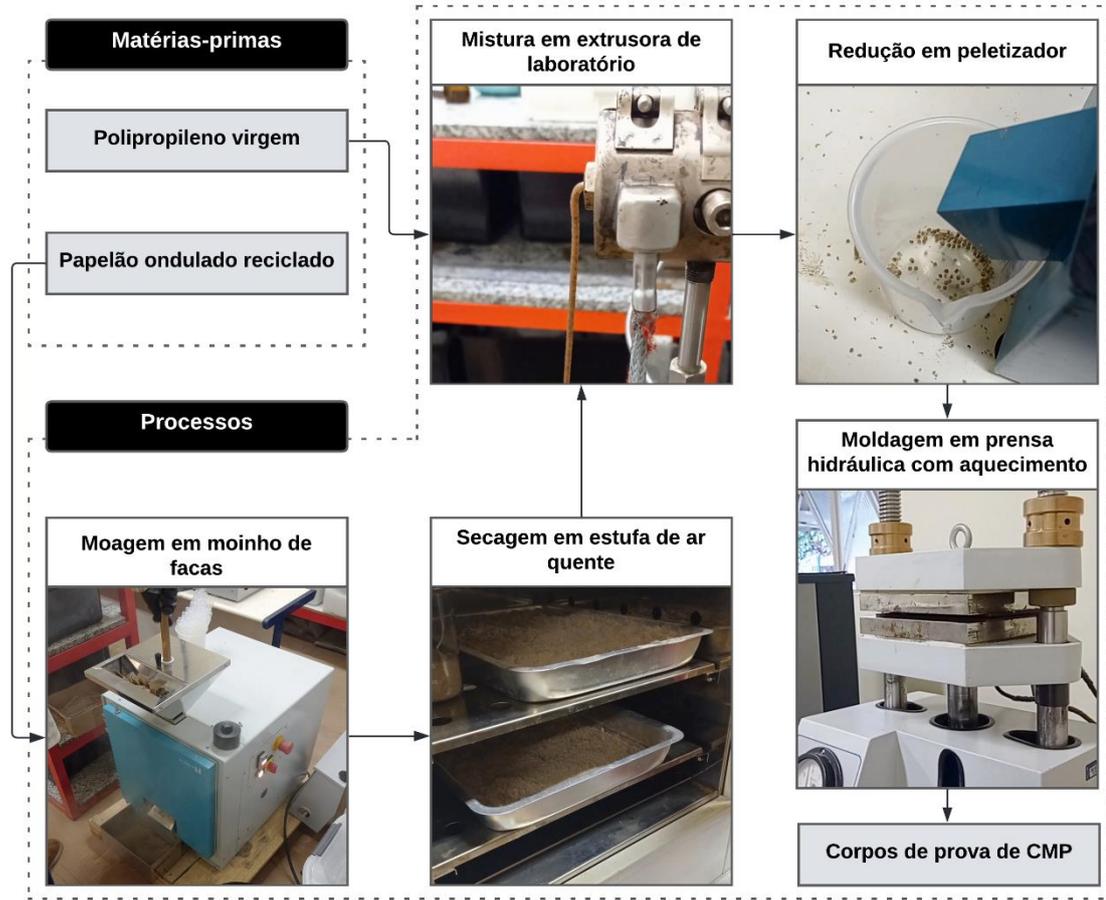
**Tabela 4.3 – Traços dos compósitos poliméricos compostos por PPv e POr, em porcentagem de massa.**

<b>Formulação</b>	<b>PPv (%m)</b>	<b>POr (%m)</b>
100PPv	100	0
95PPv5POr	95	5
90PPv10POr	90	10
85PPv15POr	85	15
80PPv20POr	80	20

Os Corpos de Prova (CP) foram moldados, a partir dos grãos peletizados, por compressão a quente em prensa hidráulica com aquecimento (SL11, SOLAB), em temperatura de 180 °C e 5 toneladas de fechamento (aproximadamente 25MPa) por um período de 5 minutos. Foram utilizadas duas chapas de compressão e um molde metálico para amostras, em forma de haltere, com as seguintes dimensões: comprimento da seção estreita de 57,0 mm; largura da seção estreita de 13,0 mm e espessura de 3,2 mm. Após a prensagem, os CP foram deixados em repouso por 30 minutos, sob a mesma pressão de moldagem, antes de serem desmoldados. A

Figura 4.1 apresenta um fluxograma com as matérias-primas e processos envolvidos na produção dos CP de CMP.

Figura 4.1 – Matérias-primas, processamento do POr e produção dos CP de CMP.



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.2 Processos de caracterização dos CMP

Os ensaios de tração dos CMP foram realizados em Máquina Universal de ensaios (EMIC 23-20, Instron), com velocidade de separação das garras de 50 mm/min, de acordo com a norma D638 (ASTM, 2014), operada em temperatura ambiente (aproximadamente 23 °C). Os resultados foram obtidos a partir da média aritmética de 6 CP ensaiados, com precisão de 0,1%. Foram avaliados os parâmetros de deformação à tração, módulo de elasticidade e máxima tensão à tração. Os ensaios de flexão foram realizados de acordo com a norma D790 (ASTM, 2007), também utilizando a Máquina Universal de ensaios Instron, modelo EMIC 23-20, com a determinação das propriedades de resistência à flexão, módulo de elasticidade e deformação

sob flexão. Os resultados foram obtidos a partir da média aritmética de 6 CP ensaiados, com precisão de 0,1%. E, para aferir o potencial de absorção dos compósitos, foram utilizados 4 CP de cada um dos traços da Tabela 1. Suas massas foram determinadas utilizando uma balança de precisão METTLER TOLEDO, modelo PG203-S. Após a pesagem, os CP foram submersos em água destilada mantida em temperatura ambiente (23,9 °C). Decorridas 24 horas de imersão, os CP foram retirados e secos superficialmente para eliminação do excesso de água. Posteriormente foi realizada uma nova pesagem para determinar a massa das amostras saturadas. As condições de ensaio e fórmula de cálculo da água absorvida são indicadas na Norma NBR 9486 (ABNT, 2011). Para o ensaio de inchamento também foram utilizados 4 CP de cada traço. Os seguintes procedimentos foram adaptados da Norma NBR 9535 (ABNT, 2011): com o auxílio de um paquímetro digital as espessuras do centro de cada CP foram aferidas antes de serem imersos em água destilada por 24 horas, mantida em temperatura ambiente (23,9 °C). Depois de removidos da água e secos superficialmente, as espessuras nos centros dos CP foram medidas novamente. Para o cálculo do inchamento, utilizou-se a relação entre a diferença de espessura do CP saturado e seco e a espessura do CP seco.

### **4.3 Resultados e Discussões**

#### **4.3.1 Materiais e Compósitos Madeira-Plástico**

O processamento do material bruto resultou em uma farinha de POr com partículas menores que 1,75 mm e densidade de 0,754 g/cm<sup>3</sup>. O PPv, por sua vez, possui densidade de 0,905 g/cm<sup>3</sup> e índice de fluidez igual a 3,5 g/10 minutos (BRASKEM, 2019).

Os CP de CMP com diferentes teores de carga de POr, assim como o CP de PPv utilizado como amostra de controle, podem ser observados na Figura 4.2.

**Figura 4.2 – Amostras de controle e de CMP.**

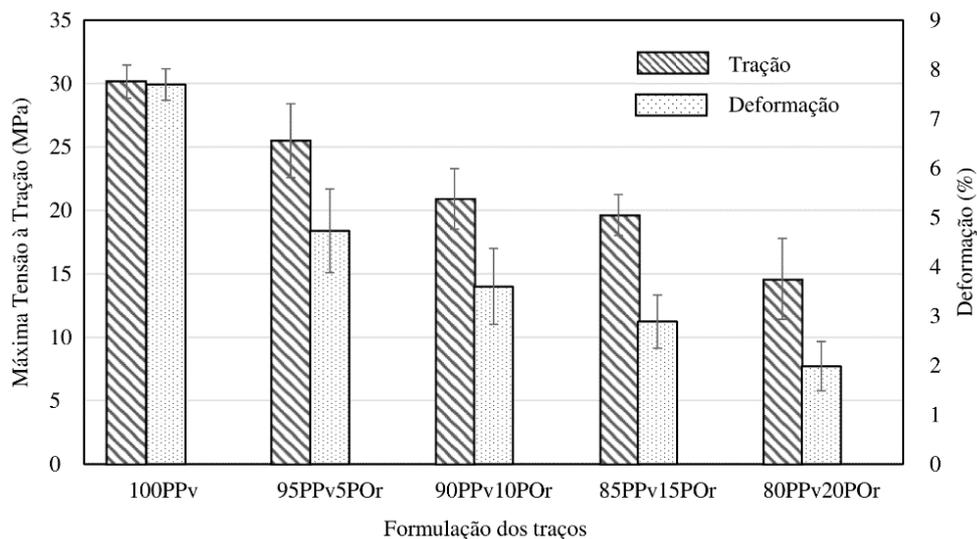


Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.3.2 Caracterização físico-mecânica das amostragens de controle e compósitos

Na Figura 4.3 são apresentados os valores médios de tensão e deformação na força máxima para o ensaio de tração das amostragens.

**Figura 4.3 – Resistência à tração e deformação das amostragens de controle e compósitos.**



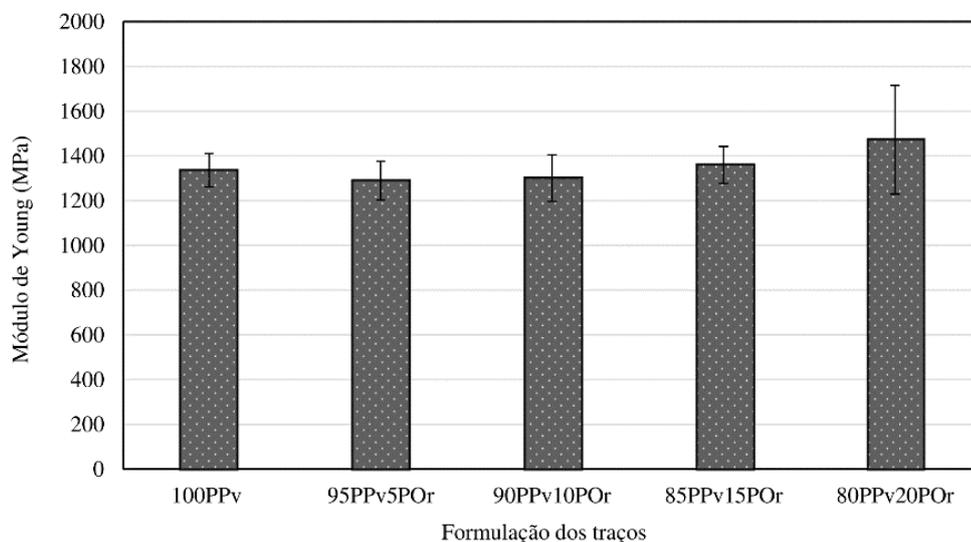
Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar que quanto maior a quantidade de papelão na amostra, menor a resistência à tração, indicando um piora na transferência de esforços da matriz polimérica para a carga de reforço. Em relação à amostra de controle (100PPv), a adição de 5% em massa de POOr provocou a perda de 15% de resistência, caindo de 30,16MPa para 25,50MPa. Este

decréscimo chega a 52% na amostra com maior teor de carga, com resistência média à tração de 14,60MPa. Valores de resistência à tração inversamente proporcionais à quantidade de carga adicionada também foram observados por Scheeren, Mählmann e Müller (2020). Isso evidencia que a imiscibilidade entre matriz e carga pode ficar mais acentuada quando o percentual de carga de enchimento é alto. Uma possível forma de contornar este comportamento imiscível do PP em relação à carga, seria utilizar um aditivo ou agente compatibilizante para aumentar a adesão interfacial dos materiais. Contudo, mesmo com a evidente melhora propiciada pelos agentes compatibilizantes, as propriedades mecânicas obtidas em outros estudos são inferiores às encontradas para amostras de CMP com até 20% de POr (LIMA, *et al.*, 2021; KUMAR *et al.*, 2020; LUBIS *et al.*, 2020). Isso evidencia a grande influência do material escolhido como carga nas propriedades mecânicas do compósito. Os valores de resistência à tração máxima encontrados por Mazzanti *et al.* (2020) também foram inferiores aos deste estudo: a amostra com maior resistência produzida pelos autores foi superada em 7% pela amostra 80PPv20POr.

A Figura 4.4 apresenta os valores médios do módulo de elasticidade por tração das amostras.

**Figura 4.4 – Módulo de elasticidade na tração das amostragens de controle e compósitos.**



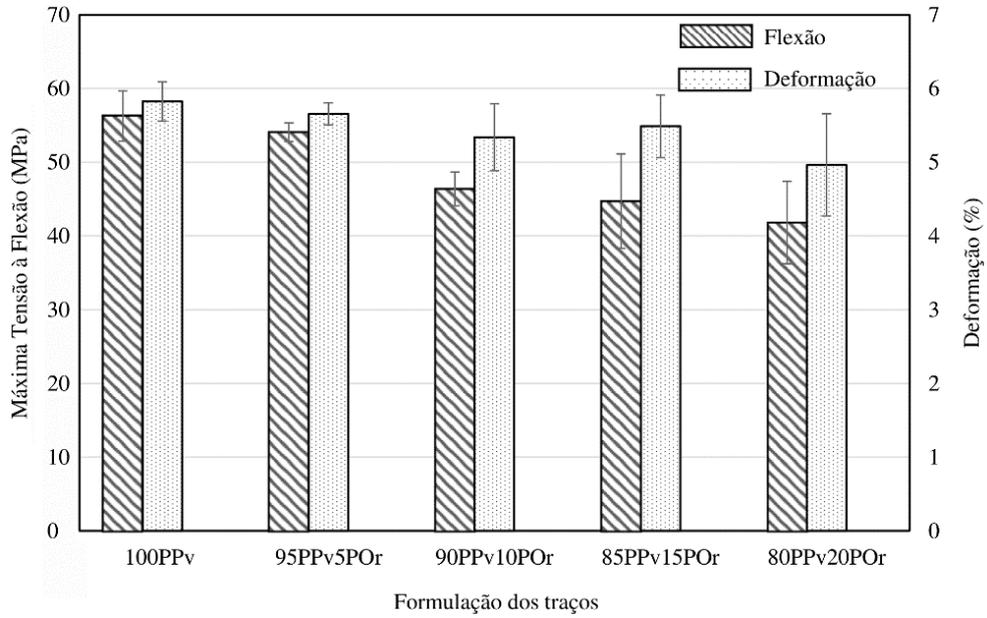
**Fonte: Elaborado pelo autor**

Percebe-se que, dentre os materiais compósitos, os valores de módulo aumentaram de acordo com o acréscimo de carga, sendo este efeito mais intenso no traço 80PPv20POr, que ultrapassou o valor médio para o PPv puro (100PPv). Uma boa distribuição das fibras no

compósito tem grande influência nos valores de módulo de elasticidade (GOMES *et al.*, 2021). Sendo assim, essa melhora da propriedade de rigidez provavelmente está associada ao acréscimo do teor de carga de papelão, e consequente distribuição da carga. As formulações 85PPv15POr e 80PPv20POr se apresentaram como os materiais mais rígidos: valores médios de módulo iguais a 1360 e 1473 MPa, respectivamente. Os resultados de módulo são coerentes com os resultados de deformação na tração máxima (Figura 4.3). Ou seja, houve uma redução da deformação conforme o teor de papelão aumentou nas amostras. Enquanto o PPv obteve uma deformação de 7,7%, as amostras com 5, 10, 15 e 20% de papelão obtiveram 4,7; 3,6; 2,9 e 2,0%, respectivamente. Nota-se desta forma uma redução clara da ductilidade dos compósitos ligada ao aumento do teor de carga, sendo o mesmo comportamento observado em outros estudos (SCHNEIDER *et al.*, 2020; HEJNA *et al.*, 2021; BOUHAMED *et al.*, 2020).

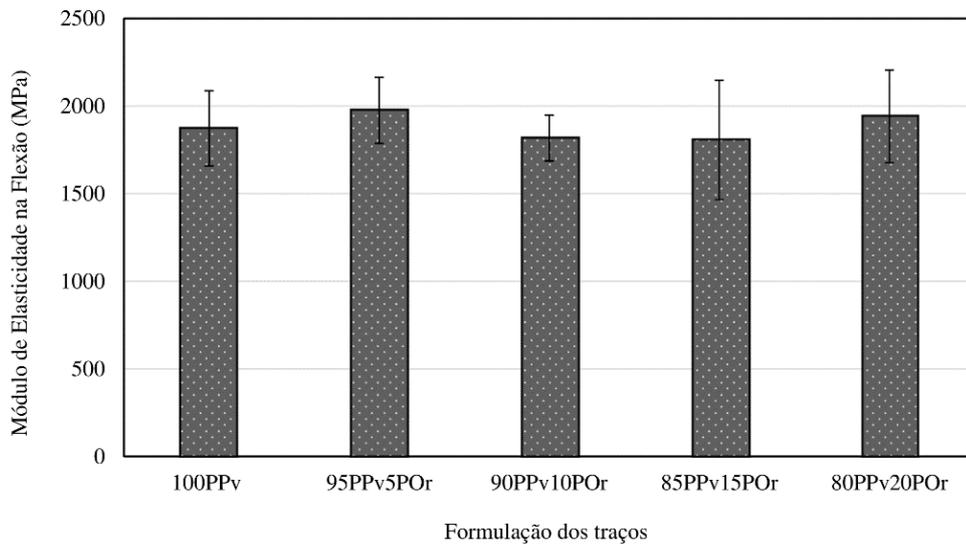
Nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 são apresentados, respectivamente, os valores médios de tensão e deformação na força máxima para o ensaio de flexão, os valores médios do módulo de elasticidade na flexão e o comportamento das amostras, observando as flechas obtidas a partir de determinadas forças aplicadas. Assim como no ensaio de tração, a adição de POr prejudicou o desempenho mecânico do PP puro, entretanto o decréscimo de resistência foi menos acentuado: queda de 4% para 95PPv5POr e de 25% para 80PPv20POr. Considerando os valores de desvio padrão, há uma equivalência entre os módulos de elasticidade atingidos na flexão, evidenciando que o acréscimo de carga não interferiu significativamente na rigidez do material como nos ensaios de tração. Possivelmente isso ocorreu devido a variações mínimas nas dimensões dos CP. Como a rigidez à flexão não depende somente da rigidez dos materiais componentes, mas também de sua geometria, mudanças na espessura dos CP podem levar a um aumento exponencial da inércia, e consequente aumento da rigidez, que compensa as propriedades de rigidez dos materiais. As propriedades mecânicas de flexão também podem ser melhoradas por meio de um agente de acoplamento como o anidrido maleico (KALE *et al.*, 2017). Ainda assim, os valores encontrados sem a utilização do agente podem superar CMP que optaram pela inclusão do material (LIMA *et al.*, 2021).

**Figura 4.5 – Resistência à flexão e deformação das amostragens de controle e compósitos.**



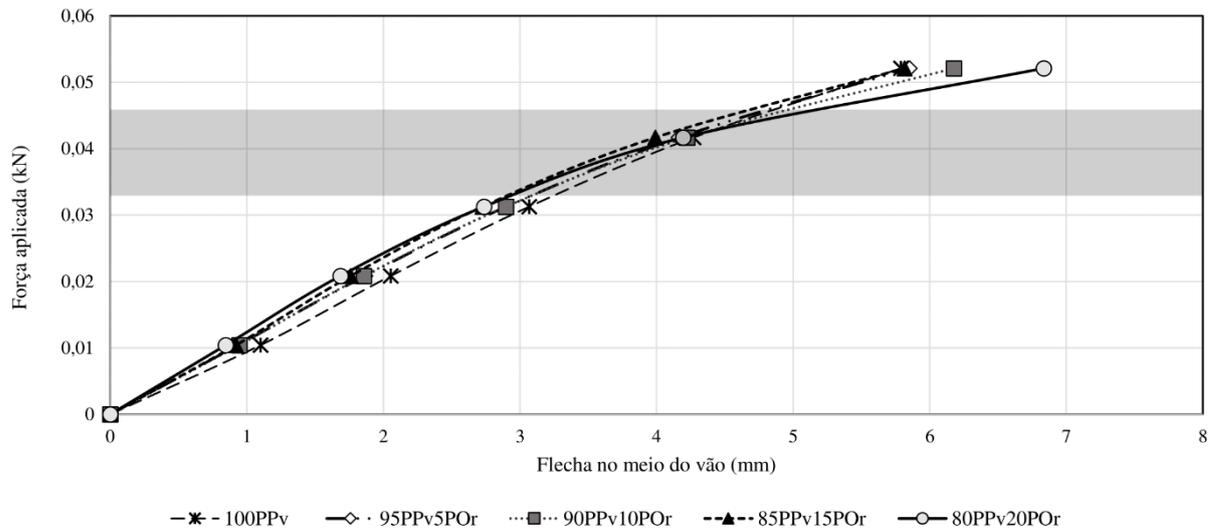
**Fonte: Elaborado pelo autor**

**Figura 4.6 – Módulo de elasticidade na flexão das amostragens de controle e compósitos.**



**Fonte: Elaborado pelo autor**

**Figura 4.7 – Comportamento das amostragens de controle e compósitos a partir das flechas.**



**Fonte: Elaborado pelo autor**

Analisando as flechas alcançadas pelos CP submetidos à flexão (Figura 4.7), pode-se observar que do início dos ensaios até o esforço aplicado de 0,032kN, as amostras apresentam um comportamento linear padronizado. Neste caso, para uma mesma força aplicada, aquelas com maior teor de carga apresentam maior rigidez, deformando menos em comparação às amostras com menos carga. A região mais escura demarcada no gráfico representa a zona de transição das amostras do regime elástico para o regime plástico. O limite inferior (0,0327kN) indica a força média aplicada para se alcançar a tensão máxima no escoamento resistida pela amostra 80PPv20POr, enquanto o limite superior (0,0460kN) indica a força média aplicada para se alcançar a tensão máxima no escoamento resistida pela amostra de controle. Percebe-se que, após ultrapassarem esta zona de transição, há uma mudança de comportamento nas amostras, especialmente daquela com maior carga de POr (20%), que passa a apresentar a maior flecha para uma mesma força aplicada. A amostra de controle (100PPv) faz o caminho inverso, apresentando umas das menores flechas. Desta forma, pode-se presumir que as amostras com maior teor de carga passaram a acumular maiores deformações residuais para o mesmo esforço aplicado, visto que elas teriam migrado do regime elástico para o plástico.

### 4.3.3 Absorção e inchamento

O papelão possui natureza hidrofílica, esta que advém de propriedades de sua matéria-prima. Desta forma, ao utilizar o POr como carga de um CMP, é de suma importância avaliar o comportamento deste material na presença de água. Na Tabela 4.2 são apresentados os valores médios de absorção e inchamento dos compósitos, depois de imersos durante 24h em água destilada mantida em temperatura ambiente, cerca de 23,9 °C.

**Tabela 4.2 – Valores médios de Absorção e Inchamento (%).**

Formulação	Absorção (%)	Inchamento (%)
100PPv	0,013 0,009*	0,000 0,000*
95PPv5POr	0,061 0,017*	0,000 0,000*
90PPv10POr	0,207 0,095*	2,062 2,406*
85PPv15POr	0,355 0,115*	2,941 1,987*
80PPv20POr	1,052 0,125*	2,885 1,923*

\* Valores do desvio padrão

Como esperado, a amostra de controle composta inteiramente por PP não absorveu valor significativo de água, como também não apresentou alteração em sua espessura. Enquanto isso, a adição de carga proporcionou o surgimento e aumento destes valores. O PP apresenta característica hidrofóbica; desta forma, nos casos em que a carga é mínima, a matriz de PP permite o melhor recobrimento da carga e consegue dificultar a absorção da umidade pelas fibras, o que manteve a sua estabilidade dimensional. A amostra crítica, produzida com 80% de PP e 20% de POr, apresenta absorção de 1,06% e inchamento de 2,89%.

Ressalta-se que o tipo de processamento pode interferir diretamente nestes valores de absorção e inchamento dos compósitos, bem como no seu desempenho mecânico, uma vez que o processo de extrusão pode ocasionar a incorporação de ar, afetando a adesão mecânica entre o PP e o papelão. Estudos mostram que a injeção garante melhor envelopamento da carga e conseqüente melhor empacotamento e impermeabilização (VIOLA, 2012), quando comparada à extrusão seguida por compressão a quente (utilizadas no presente trabalho); enquanto esta última técnica produz resultados melhores que a compressão a frio seguida de compressão a quente (MACEDO *et al.*, 2015). Além disso, o molhamento eficiente das fibras pelo polímero ocasiona a remoção do ar e cobre todas as suas protuberâncias. Este mecanismo, que depende

das tensões superficiais dos componentes, fica impossibilitado de ocorrer quando há camadas de água na superfície das fibras hidrofílicas (YAMAJI, 2004).

#### **4.4 Conclusão**

Com a presente pesquisa avaliou-se a aplicabilidade dos resíduos de papelão como carga de enchimento na produção de CMP à base de PP. Diferente de outros materiais, o POr não possibilitou a obtenção de compósitos com elevados teores de fibra, sendo 20% o maior teor de carga alcançado, em massa. Isto se deve às limitações de equipamentos vinculados ao tipo de processamento escolhido, como a extrusora de laboratório, cuja alimentação com materiais de baixa densidade, como é o caso do POr, deve ser feita manualmente. A granulometria da carga lignocelulósica também pode ter influenciado no processamento e nas propriedades avaliadas, sendo esta uma caracterização a ser implementada em pesquisas futuras. Ainda assim, as propriedades alcançadas foram mais promissoras que as apresentadas em outras pesquisas usando traços semelhantes de matriz e carga.

Com a adição do POr as amostras apresentaram perda de resistência mecânica em relação ao PPv puro. Entretanto, os compósitos produzidos apresentaram melhora na rigidez, quando comparados à amostra de controle, demonstrando menor tendência à deformação. Isso favorece sua aplicação em segmentos da construção civil, como decks, tapumes, cercas e revestimentos.

Ainda, quanto ao desempenho físico, o aumento da carga no compósito resultou em valores maiores de absorção e surgimento do comportamento de inchamento, propriedade herdada do POr devido à sua característica hidrofílica. Esta variação do teor de umidade pode ainda evidenciar uma rede de microfaturas do compósito que pode afetar suas propriedades mecânicas. Ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) podem auxiliar na avaliação da concentração dos poros nas regiões de ruptura e da interação entre a carga de POr e a matriz de PPv, principalmente quanto ao recobrimento da carga. Ainda assim, o traço crítico absorveu pouco mais que 1% em massa de água, o que pode indicar uma estabilidade dimensional desta combinação de materiais em ambientes úmidos. Embora apresentem valores crescentes de rigidez, os traços com 10, 15 e 20% de POr decaem em alguns aspectos de resistência mecânica além de apresentar os maiores valores de absorção e inchamento. Por sua vez, o traço com 5% de POr, correspondente ao menor teor de carga entre as amostras, demonstra um reaproveitamento mínimo do resíduo proveniente do papelão ondulado. Desta

forma, no que diz respeito à um equilíbrio entre propriedades alcançadas e reaproveitamento de resíduos, a amostra 90PPv10POr se torna uma das mais atrativas para trabalhos futuros.

O aspecto visual alcançado merece destaque. A cor advinda da mistura de papelão e PP, remete à madeira natural, o que valoriza o material e facilita sua aceitação no mercado como substituto das espécies arbóreas. Desta forma, acredita-se que o material avaliado pode atuar como CMP em substituição à madeira natural, gerando ainda uma destinação adequada aos resíduos de papelão ondulado, além de contribuir para a redução do extrativismo de recursos naturais. Ainda, a avaliação do ciclo de vida do CMP pode se apresentar como um importante instrumento para complementar os resultados da presente pesquisa. Representa, enfim, um produto com grande potencial para suprir a demanda de um mercado consumidor cada vez mais conscientizado a respeito da preservação ambiental.

#### 4.5 Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D638 – 14: Standard test method for Tensile properties of plastics. West Conshohocken, PA, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D790-07: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. West Conshohocken, PA: Astm, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14257: Papel e cartão - Tubetes - Determinação da umidade - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9486: Compensado – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9535: Compensado - Determinação do inchamento - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

BASALP, Dildare *et al.* Utilization of municipal plastic and wood waste in industrial manufacturing of wood plastic composites. *Waste and Biomass Valorization*, v. 11, n. 10, p. 5419-5430, 2020.

BOUHAMED, Nesrine *et al.* Ultrasound evaluation of the mechanical properties as an investigation tool for the wood-polymer composites including olive wood flour. *Mechanics of Materials*, v. 148, p. 103445, 2020.

BRASKEM. Folha de dados - Polipropileno PG35L. Braskem, 2019. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/cms/Principal/ModuloProduto/DownloadFolhaDados?idFolha=HECYK KCesNg=&idIdioma=YrItVniimrc=&idTipo=YrItVniimrc=&idProduto=yN9iNvIyyt4=&pasta=T46EDfq+gkM=&guid=dcf901ab-82db-46e8-a1db-dd69fa08b458>. Acesso em: 30 jun. 2022.

BRASKEM; Glossário de Termos Aplicados a Polímeros - Boletim Técnico n° 08, 2016. Disponível em: [https://www.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/html/boletm\\_tecnico/Glossario\\_de\\_termos\\_aplica\\_dos\\_a\\_polimeros.pdf](https://www.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/html/boletm_tecnico/Glossario_de_termos_aplica_dos_a_polimeros.pdf). Acesso em 08 out 2021.

- BÜTÜN, F. Yağmur *et al.* Recovering fibres from fibreboards for wood polymer composites production. *International Wood Products Journal*, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 42–49, 2018.
- CARUS, Michael *et al.* Wood-plastic composites (WPC) and natural fibre composites (NFC). Nova-Institute: Hürth, Germany, v. 16, p. 1-16, 2015.
- ESKANDER, Samir B.; TAWFIK, Magda E.; TAWFIC, Medhat L. Mechanical, flammability and thermal degradation characteristics of rice straw fiber-recycled polystyrene foam hard wood composites incorporating fire retardants. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, [s. l.], v. 132, n. 2, p. 1115–1124, 2018.
- FRANÇA, Brenda. Embalagens disparam na pandemia, mas reciclagem não acompanha. Agência Nossa, 2020. Disponível em: <https://www.agencianossa.com/2020/12/18/embalagens-disparam-na-pandemia-mas-reciclagem-nao-acompanha/>. Acesso em: 08 out. 2021.
- GOMES, Diogo Antonio Correa *et al.* VIABILIDADE DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS DE POLIPROPILENO REFORÇADOS COM FIBRA DE BAMBU. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, v. 15, n. 4, p. 511-522, 2021.
- HEJNA, Aleksander *et al.* Coffee silverskin as a multifunctional waste filler for high-density polyethylene green composites. *Journal of Composites Science*, v. 5, n. 2, p. 44, 2021.
- JUBINVILLE, Dylan *et al.* Thermo-mechanical recycling of polypropylene for the facile and scalable fabrication of highly loaded wood plastic composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 219, p. 108873, 2021.
- KALE, Amey *et al.* Lantana fiber-filled polypropylene composite. In: *Wood is Good*. Springer, Singapore, 2017. p. 343-351.
- KIELING, A.; PEREIRA, S.; DOS SANTOS, Maria Cristina. Compósitos de madeira plástica: considerações gerais. *Scientia Amazonia*, v. 8, n. 1, p. B1-B14, 2019.
- KRAUSE, Kim Christian *et al.* Utilization of recycled material sources for wood-polypropylene composites: Effect on internal composite structure, particle characteristics and physico-mechanical properties. *Fibers*, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 1–18, 2018.
- KUMAR, Vikram *et al.* Effect of gamma irradiation on tensile and thermal properties of poplar wood flour-linear low density polyethylene composites. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 174, p. 108922, 2020.
- LIMA, Lety del Pilar Fajardo Cabrera de *et al.* Use of organic acids in bamboo fiber-reinforced polypropylene composites: mechanical properties and interfacial morphology. *Polymers*, v. 13, n. 12, p. 2007, 2021.
- LUBIS, A. M. H. S. *et al.* Mechanical properties of oil palm frond wood filled thermoplastic polyurethane. *Int J Nanoelectron M*, v. 13, p. 255-266, 2020.
- MACEDO, Laurenn B. de *et al.* Propriedades físicas de painéis aglomerados de madeira produzidos com adição de película de polipropileno biorientado. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental*, v. 19, p. 674-679, 2015.

- MALPASS, D. B.; BAND, E. I. Introduction to Industrial Polypropylene. In: 1a ed. Beverly: Scrivener Publishing, 2012. p. 1–18.
- MAZZANTI, Valentina *et al.* Correlation between mechanical properties and processing conditions in rubber-toughened wood polymer composites. *Polymers*, v. 12, n. 5, p. 1170, 2020.
- MELLO, Daniel. Comércio eletrônico e delivery aumentam consumo de embalagens. Agência Brasil, 2020. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2020-10/comercio-eletronico-e-delivery-aumentam-consumo-de-embalagens>. Acesso em: 08 out. 2021.
- NASCIMENTO, Amanda dos Santos *et al.* Substituição de agregado muído do concreto simples por polipropileno (PP). *Diálogos Interdisciplinares*, v. 7, n. 4, p. 6-11, 2018.
- REDAÇÃO E-COMMERCE BRASIL. Covid-19: 61% dos consumidores aumentaram volume de compras online. E-Commerce Brasil, 2020. Disponível em: <https://www.ecommercebrasil.com.br/noticias/consumidores-aumentaram-compras-online-coronavirus/>. Acesso em: 24 jun. 2022.
- REIS, Guilherme F. *et al.* AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ENVELHECIMENTO POR RAIOS ULTRAVIOLETAS DE MISTURAS DE POLIPROPILENO COM MATERIAL RECICLADO A PARTIR DA ADIÇÃO DE NEGRO DE FUMO. CBPol – Congresso brasileiro de Polímeros, 12, 2013, Florianópolis, SC, Brasil. Disponível em: <http://e-democracia.com.br/cbpol/anais/2013/pdf/6FNF.pdf>. Acesso em 08 out. 2021.
- RIZVI, Ghaus M.; SEMERALUL, Hamid. Glass-fiber-reinforced wood/plastic composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 39–42, 2008.
- SCHNEIDER, Denise; MÄHLMANN, Cláudia Mendes; MÜLLER, Franciélli. 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.
- SCHNEIDER, Eduardo Luis *et al.* Reaproveitamento de resíduo de placas de circuito impresso como cargas em compósitos de polipropileno. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, 2020.
- SPADETTI, Carolini *et al.* Propriedades térmicas e mecânicas dos compósitos de Polipropileno pós-consumo reforçados com fibras de celulose. *Polímeros*, v. 27, p. 84-90, 2017.
- VIOLA, N. M. Produção e caracterização física e mecânica de compósito plástico-madeira. 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, São Paulo, 2012.
- YAMAJI, F. M. Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira. 2004. 182f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- ZULKIFLI, N. Izzati *et al.* Mechanical properties and failure modes of recycled polypropylene/microcrystalline cellulose composites. *Materials & Design*, v. 69, p. 114-123, 2015.

# CAPÍTULO 5

---

Proposição de Compósitos Madeira-Plástico produzidos a partir de polipropileno virgem e resíduos da pandemia de Covid-19

## 5 CAPÍTULO 5 – PROPOSIÇÃO DE COMPÓSITOS MADEIRA-PLÁSTICO PRODUZIDOS A PARTIR DE POLIPROPILENO VIRGEM E RESÍDUOS DA PANDEMIA DE COVID-19

### Resumo

A pandemia de Covid-19 provocou um aumento na geração de resíduos, com destaque para o papelão ondulado e as máscaras de Tecido Não Tecido (TNT). Nesse contexto, pretendeu-se avaliar a aplicabilidade destes resíduos pandêmicos na produção de um Compósito Madeira-Plástico (CMP) com matriz de Polipropileno reciclado (PPr), proveniente das máscaras de TNT misturado a Polipropileno virgem (PPv); e carga de enchimento de Papelão Ondulado reciclado (POr). Os materiais residuais foram submetidos a etapas de processamento para a adequação de suas propriedades (partículas secas e com tamanho  $\leq 1,75$  mm) e também à análise termogravimétrica. Com base em estudos anteriores, foram propostos CMP com teores de PPv, PPr e POr iguais a 45%, 45% e 10%, respectivamente. Foram produzidos dois CMP diferentes variando o tipo processamento: o primeiro por meio de dupla extrusão seguida por compressão a quente; e o segundo por meio de homogeneização termocinética seguida por compressão a quente. Para fins de comparação, foram produzidas três amostras de controle utilizando extrusão única seguida por compressão a quente: um CMP (90% PPv e 10% POr); uma blenda (50% PPv e 50% PPr) e uma amostra de PPv puro (100% PPv). Estas amostras, junto às de madeira plástica comercial e madeira natural, foram submetidas a ensaios mecânicos (tração e flexão) e físicos (absorção e inchamento), além de análise térmica e microestrutural. Os resultados obtidos validaram as faixas de temperatura utilizadas nos procedimentos sem o risco de decomposição ou combustão das matérias-primas residuais. O compósito com ambos materiais residuais homogeneizado por extrusão apresentou resultados superiores de resistência e rigidez quando comparado com o compósito homogeneizado termocineticamente e com as amostras de controle precursoras. Também superou uma amostra de CMP comercial, tanto em propriedades mecânicas quanto físicas, sugerindo seu potencial de aplicação no mercado.

**Palavras-chave:** Compósito Madeira-Plástico, TNT, Papelão ondulado, Polipropileno, Pandemia.

---

## 5.1 Introdução

As novas dinâmicas de vida diante do isolamento social e das medidas de proteção adotadas durante a pandemia do Covid-19 levaram a um acréscimo na geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em todo o mundo. No Brasil, apenas em 2020, foram gerados aproximadamente 82,5 milhões de toneladas de RSU, 225.965 toneladas diárias, um aumento de mais de 4% em relação ao ano de 2019, como informado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2021). A mudança é expressiva visto que, entre 2010 e 2019, os 10 últimos anos antes da pandemia, este incremento foi de 18% (ABRELPE, 2020). Um tipo específico de plástico teve sua produção e consequente descarte intensificados durante este período. Trata-se do TNT, principal matéria-prima utilizada na fabricação de Equipamentos de Proteção Individual (EPI). Em 2020, uma das maiores fabricantes de TNT do Brasil chegou a dobrar sua produção, em relação ao ano anterior (ACIC, 2020).

Devido à sua capacidade produtiva, manipulação direta e vasta oferta, o TNT é um material barato, frequentemente empregado em produtos descartáveis como é o caso das máscaras faciais (LINHARES, 2020). O uso das máscaras fabricadas com este material tem sido apresentado como uma importante barreira para a disseminação de aerossol e gotículas contendo o vírus suspensas no ar (CAMARGO *et al.*, 2020); e desde o início da pandemia, milhões delas têm sido produzidas (FISCHER *et al.*, 2020). Após a sua utilização, este material tem se transformado em lixo e sido descartado em aterros ou usinas de incineração, podendo se tornar um grande problema para a saúde humana e o meio ambiente. Se esta vasta quantidade de máscaras pós-consumo for reprocessada, o material resultante pode ser aplicado na produção de CMP, que têm se apresentado como uma nova e promissora alternativa de reciclagem para o plástico (PORTELA JUNIOR *et al.*, 2019).

Assim como outros compósitos, o CMP é composto de dois ou mais constituintes diferentes. A matriz é a fase contínua que dá forma ao compósito, enquanto a carga de reforço ou enchimento é adicionada para aumentar a resistência mecânica e a rigidez da mistura (CARDARELLI, 2018). A matriz de um CMP pode ser constituída de diversos polímeros, com destaque para o Polipropileno (PP) e Polietileno (PE) (CHUN *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2021; YADAV *et al.*, 2021). O TNT é composto de PP; sendo assim, é possível que o TNT reciclado, proveniente das máscaras, funcione, sozinho ou combinado com o PPv, como parte da matriz polimérica de um CMP. As propriedades inferiores advindas do PPr podem ser

melhoradas com a incorporação de fibras sintéticas ou naturais como carga de enchimento ou reforço (ZULKIFLI *et al.*, 2015).

Dentre os principais materiais empregados como carga em CMP estão os resíduos de madeira natural, em forma de farinha ou fibra, resultantes de atividades de serragem e beneficiamento. Ainda assim, outros materiais residuais fibrosos de origem vegetal podem ser utilizados, como a fibra de coco, bambu, casca de arroz ou casca de aveia (ESKANDER; TAWFIK; TAWFIC, 2018; BOCHKOV *et al.*, 2019; KIELING *et al.*, 2019; KLYOSOV, 2007). Sua incorporação visa reduzir o custo geral do compósito e melhorar algumas de suas propriedades mecânicas (ZHANG; CUI; ZHANG, 2013). No presente trabalho, pretende-se usar como carga de enchimento um material residual, lignocelulósico, que assim como o TNT, teve sua produção e descarte aumentados durante a pandemia: o papelão ondulado. Segundo a Associação Brasileira de Papelão, a expedição do material atingiu mais de 343 mil toneladas em setembro de 2020, maior nível desde 2005 (ABPO, 2020). Isso porque a pandemia estimulou o crescimento do comércio eletrônico e *delivery*, o que fez aumentar o consumo de embalagens. Porém, devido o fechamento de diversas unidades de triagem, a reciclagem não foi capaz de absorver esse aumento do volume de materiais descartados (MELLO, 2020).

Decks e peças internas automotivas são os setores de aplicação mais importantes para CMP, seguidos por tapumes e cercas (CARUS *et al.*, 2015). Somado ao potencial de reciclagem de diferentes resíduos, os CMP podem contribuir ainda para a redução da taxa de extração de madeira natural (KESKISAARI; KARKI, 2018) e substituição de suas aplicações. Isso porque os CMP podem apresentar propriedades iguais ou superiores às da madeira natural (CHEN *et al.*, 2020; HUANG *et al.*, 2018) e vantagens associadas à maior resistência a pragas e fungos, maior resistência à umidade e rachaduras, maior durabilidade, necessidade mínima de manutenção e versatilidade de formatos e aplicações construtivas (CABRAL *et al.*, 2016; CAVALCANTI *et al.*, 2018; CHEN *et al.*, 2020; HUANG *et al.*, 2018; CARUS *et al.*, 2015; BASALP *et al.*, 2020).

Desta forma, o objetivo deste trabalho é desenvolver um CMP a partir da mistura de PPv com PPr e PO<sub>r</sub>, dois materiais residuais gerados em grande escala durante a pandemia, e avaliar as suas propriedades. Uma ampla revisão de literatura acerca de CMP com material reciclado mostrou que produtos à base de lignocelulose reforçada, como o papelão, não foram testados

como carga de enchimento nos trabalhos encontrados. Da mesma forma, não constatou-se o uso de TNT como fonte de PP para matrizes poliméricas.

## **5.2 Materiais e Métodos**

### **5.2.1 Matérias-primas e procedimentos**

As máscaras de TNT foram adquiridas novas e destinadas ao uso experimental, para evitar qualquer risco de contaminação biológica. O material passou por um processo manual de separação das partes não compostas por PP, o que inclui as alças de elástico e cliques nasais. O papelão ondulado, por sua vez, foi obtido a partir do reaproveitamento de caixas para embalagem e transporte de mercadorias, cedidas por uma empresa de coleta e separação de materiais recicláveis em Ouro Preto – MG (Brasil). Ambos os resíduos, papelão e TNT, passaram por um processo de redução de tamanho das partículas, por meio de um moinho de facas, marca Marconi, modelo MA 580 com peneira de 1,75 mm. A farinha de papelão foi seca a 105 °C em estufa de ar quente, até atingir massa constante, para eliminar a umidade, como indica a NBR14257 (ABNT, 1998). Tais processos viabilizaram as etapas de alimentação e mistura dos materiais para a fabricação dos compósitos. O PPv utilizado foi fornecido pela Braskem, com índice de fluidez igual e 3,5 g/10 minutos e densidade de 0,905 g/cm<sup>3</sup> (BRASKEM, 2019). O POr possuía densidade de 0,754 g/cm<sup>3</sup> e o TNT, gramatura de 0,0025 g/cm<sup>2</sup>.

### **5.2.2 Dosagem e formas de processamento**

Dois CMP diferentes foram produzidos, a partir de duas formas de processamento, ambos utilizando a mesma dosagem: 45% de PPr, 45% de PPv e 10% de POr. Estes valores foram definidos a partir dos resultados obtidos nos estudos apresentados nos Capítulos 3 e 4, que avaliaram, em separado, o comportamento dos materiais residuais, TNT e papelão, incorporados à uma matriz de PPv.

O primeiro CMP foi processado via extrusão seguida por compressão a quente. Visando uma maior eficiência na mistura dos componentes e buscando evitar alguns problemas relacionados ao processo de extrusão como dificuldades na alimentação, entupimentos e interrupções, optou-se por um duplo processo de extrusão. Desta forma, primeiramente foram

extrudados misturas de PPv e PPr; e também de PPv e POr em separado, com massa total de 100g, pré-misturados em um béquer. Em sequência, ambos os materiais foram peletizados, e a mistura dos grãos resultantes, respeitando a dosagem proposta, passou por um novo processo de extrusão que gerou enfim novos pellets, agora contendo ambos materiais residuais. Em todos os ciclos foi utilizada uma extrusora monorosca de laboratório (Thermo Scientific, HAAKE PolyLab), com temperatura de 175°C nas 3 zonas de aquecimento e velocidade do parafuso de 45 rpm. Após ser extrudado com diâmetro médio de 3,40 mm, o material foi reduzido em Peletizador (AX Gran, AXPlástico) resultando em grãos de aproximadamente 3,70 mm de comprimento.

O segundo CMP foi processado via homogeneização termocinética seguida por compressão a quente. Para tanto, misturas de aproximadamente 15g com os três materiais, de acordo com a dosagem citada, foram levadas a um Homogeneizador de Laboratório (Drais), modelo MH-100 da marca MH Equipamentos, que auxiliou na dispersão da farinha de POr e PPr na matriz polimérica de PPv. Por se tratar de um misturador termocinético rotacional, a mistura dos materiais e a fusão do polímero ocorrem devido ao atrito e rotação. O material decorrente do processo, sem forma definida, é pastoso e de rápido resfriamento, não sendo comportado pelo molde utilizado na prensa hidráulica. Desta forma, foi necessário que as misturas homogeneizadas fossem novamente processadas para redução de partículas em moinho de facas, resultando em partículas menores que 1,75 mm, com aspecto pulverulento. A Tabela 5.1 apresenta as composições de cada uma das amostras utilizadas.

**Tabela 5.4 – Composição das amostras utilizadas.**

<b>Amostra</b>	<b>PPv (%m)</b>	<b>PPr (%m)</b>	<b>POr (%m)</b>
100PPv	100	0	0
50PPv50PPr	50	50	0
90PPv10POr	90	0	10
CMP-E	45	45	10
CMP-D	45	45	10
CMP-C	-	-	-
MN	-	-	-

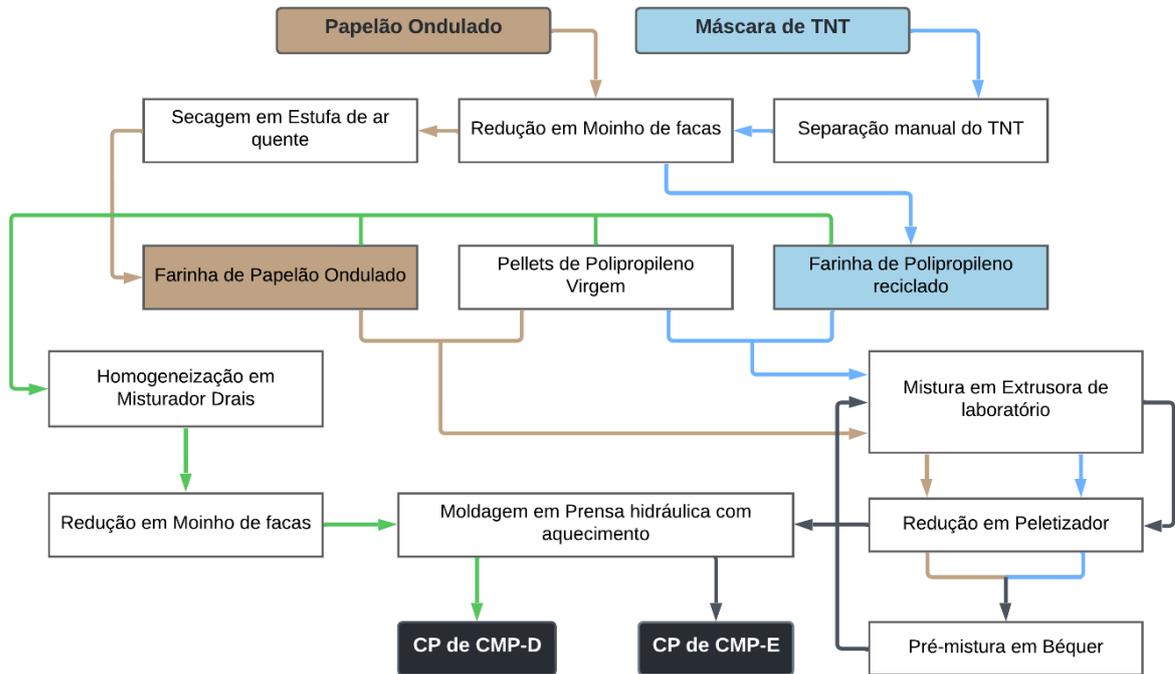
Além dos dois CMP, via extrusão (CMP-E) e via Homogeneizadora Drais (CMP-D), foram utilizadas outras 5 amostras. Dentre elas, 3 são amostras de controle, contendo os materiais precursores: a amostra com 100% de PPv (100PPv) e da blenda utilizando 50% de PPv e 50% de PPr (50PPv50PPr), apresentadas no Capítulo 3 e o compósito com 90% de PPr e 10% de POr (90PPv10POr) apresentado no Capítulo 4; além de 2 amostras de controle para fins de

comparação: um CMP comercial (CMP-C), fornecido por uma empresa de Madeira Plástica de Belo Horizonte – MG; e a madeira natural de Pinus (MN), fornecida por uma marcenaria localizada em Novorizonte – MG.

### **5.2.3 Moldagem dos corpos de prova CMP**

O mesmo procedimento de moldagem foi utilizado para a confecção dos Corpos de Prova (CP) de ambos os CMP. O material, que possuía aspecto granular no caso do processamento via extrusão e pulverulento no processamento via Drais, foi inserido no molde metálico de CP em forma de haltere, e prensado entre as duas chapas de uma prensa hidráulica com aquecimento, marca SOLAB, modelo SL11, a 180°C, sob carga de aproximadamente 25 MPa, durante 5 minutos. O molde possuía as seguintes dimensões: comprimento da seção estreita de 57,0 mm; largura da seção estreita de 13,0 mm e espessura de 3,2 mm. Após a prensagem, os CP foram deixados em repouso por 30 minutos, sob a mesma pressão de moldagem, até serem desmoldados. A Figura 5.1 apresenta um fluxograma com os insumos e processos envolvidos na produção dos CP de CMP-E e CMP-D, sendo as setas indicativas de mesma cor referentes à continuidade de um mesmo processo.

**Figura 5.1 – insumos e processos envolvidos na produção dos CP de CMP-E e CMP-D**



Fonte: Elaborado pelo autor

Todos os CP foram caracterizados e ensaiados sob as mesmas condições descritas a seguir.

#### 5.2.4 Processos de caracterização das amostragens de controle e compósitos

Para a determinação das propriedades de tração foram utilizados 6 CP de cada CMP e das amostras de controle, ensaiados em máquina universal de ensaios Instron, modelo EMIC 23-20, segundo a norma D638 (ASTM, 2014). Os CP foram submetidos ao ensaio utilizando garras para tração, com velocidade de ensaio de 50 mm por minuto, operadas em temperatura ambiente (aproximadamente 23 °C). Os resultados foram obtidos a partir de uma média aritmética dos 6 CP ensaiados, com precisão de 0,1%. E, para determinação da resistência à flexão dos CMP, foi utilizada a máquina universal de ensaios Instron, modelo EMIC 23-20, operada em temperatura ambiente (aproximadamente 23 °C), com velocidade de 30 mm por minuto. Foram ensaiados 6 CP de cada CMP e das amostras de controle e os resultados foram obtidos a partir da média aritmética (com precisão de 0,1%) dos 6 CP ensaiados. Foi utilizada para este ensaio, a norma D790 (ASTM, 2007).

Os ensaios de absorção e inchamento foram realizados a fim de analisar o comportamento dos compósitos na presença de água, visto que embora a resina virgem e os resíduos de PP sejam hidrofóbicos, o papelo é hidrofílico. Foram utilizados 4 CP de cada CMP e das amostras

de controle submersos em água destilada após pesagem inicial e aferição da espessura, sendo mantidos a uma temperatura de 24°C por 24 horas. Em sequência, os CP foram retirados e secos superficialmente, para eliminação do excesso de água, e novamente pesados e medidos. As condições de ensaio e fórmula de cálculo da água absorvida são indicadas na Norma NBR 9486 (ABNT, 2011); enquanto que o cálculo de inchamento foi adaptado a partir da Norma NBR 9535 (ABNT, 2011), utilizando a relação entre a diferença de espessura do CP saturado e seco e a espessura do CP seco. Não foram aferidos os valores de inchamento para os CP que não contém carga celulósica, sendo estes o PPv puro e Blenda de PPv com PPr em virtude de sua natureza hidrofóbica.

A Análise Termogravimétrica (TGA) foi realizada a fim de avaliar a variação mássica dos materiais precursores e dos compósitos em função da variação de temperatura e validar as faixas de temperatura utilizada nos demais procedimentos sem que houvesse a decomposição ou combustão de algum deles. Para a realização deste ensaio, foi utilizado equipamento da marca Shimadzu, modelo DTG-60H, com taxa de 10 °C/min e fluxo de atmosfera de Ar. Foram avaliados o POr e PPr triturados no moinho de facas e também os compósitos obtidos. O equipamento foi operado da temperatura ambiente até 600 °C.

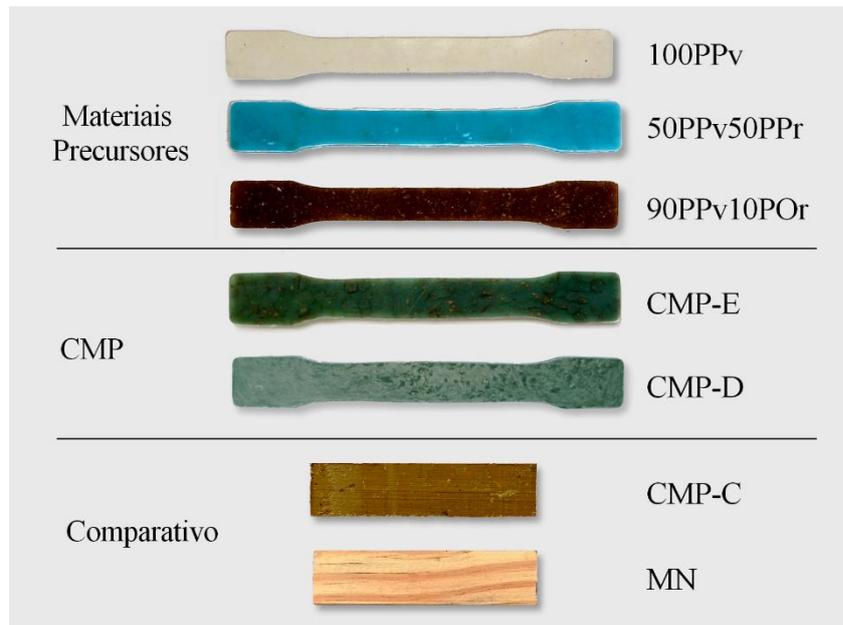
Ainda, a observação via MEV, por elétrons secundários, da superfície de fratura (seção transversal) após teste de tração dos CP de CMP e amostras de controle foi conduzida em equipamento TESCAN, Modelo VEGA 3, com fonte de elétrons de filamento de tungstênio. Todas as amostras foram recobertas com ouro em Metalizadora QUORUM, Modelo Q150R ES. Foram analisadas a superfície de fratura dos CP após os ensaios de tração observando sua morfologia e o recobrimento da carga de enchimento pela matriz polimérica.

## **5.3 Resultados e discussões**

### **5.3.1 CMP e Amostras de Controle**

Na Figura 5.2 são apresentados os CP dos compósitos produzidos utilizando 45% de PPv, 45% de PPr e 10% de POr, CMP-E e CMP-D, via extrusora e homogeneizadora Draiss, respectivamente; além das amostras de controle 100PPv, 50PPv50PPr, 90PPv10POr, CMP-C e MN.

**Figura 5.2 – CP das amostras de controle e dos CMP**

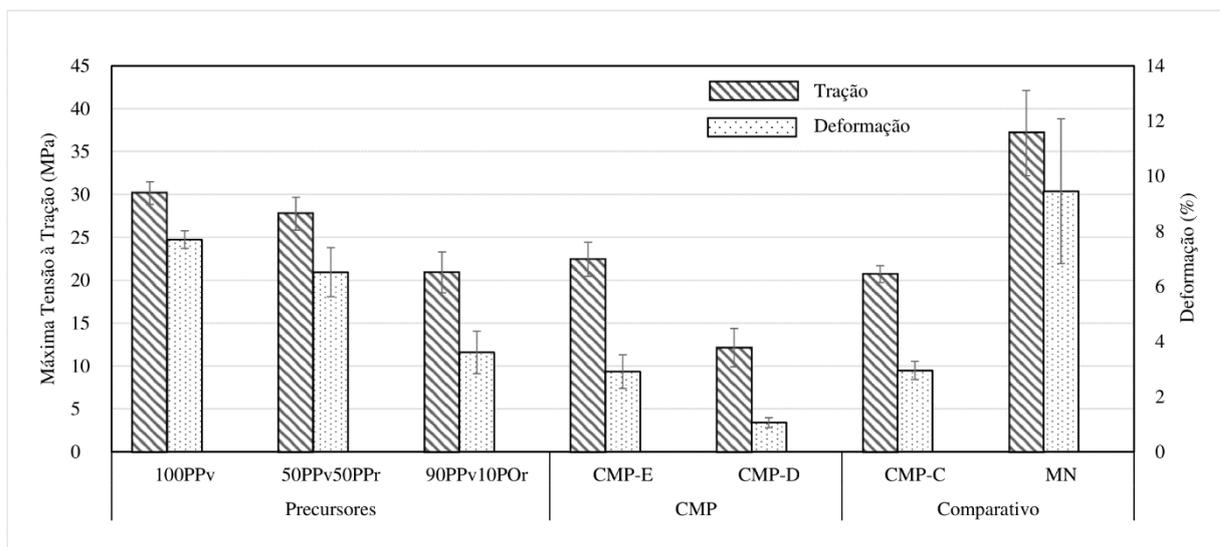


Fonte: Elaborado pelo autor

### 5.3.2 Caracterização das amostragens de controle e compósitos

Na Figura 5.3 são apresentados os valores médios de tensão e deformação na força máxima para o ensaio de tração das amostragens.

**Figura 5.3 – Resistência à tração das amostragens de controle e compósitos**



Fonte: Elaborado pelo autor

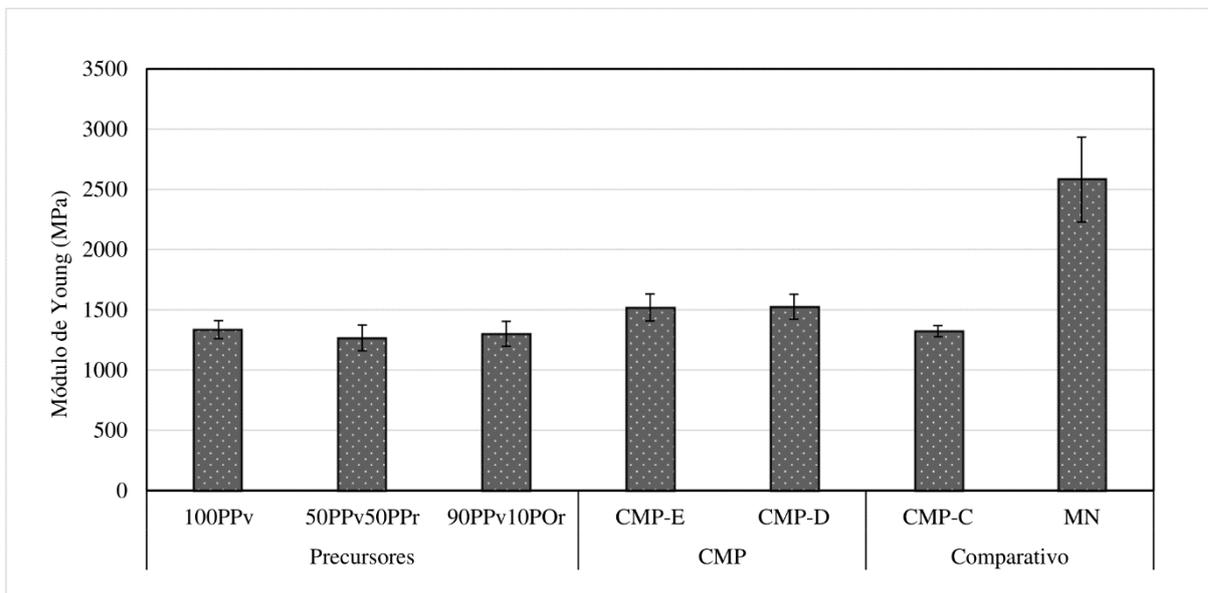
Analisando os materiais precursores, assim como o exposto nas pesquisas em que se originaram (Capítulos 3 e 4), percebe-se que a adição de materiais pós-consumo (PPr e POr) afetou negativamente a resistência à tração e deformação da resina virgem (100PPv). Perda de 8% de resistência com o acréscimo de PPr e de 31% com o acréscimo de POr. No caso da blenda 50PPv50PPr, a reciclagem do PP degrada suas propriedades mecânicas e térmicas devido à exposição a altas temperaturas (KIM *et al.*, 2007); enquanto no compósito 90PPv10POr, há uma ineficiência na transferência de esforços da matriz para a carga de reforço, levando à uma resistência inversamente proporcional à quantidade de carga adicionada (SCHEEREN; MÄHLMANN; MÜLLER, 2022).

Entretanto, para o CMP-E, este efeito negativo não foi cumulativo, ou seja, a adição de ambos materiais reciclados em um único compósito não ocasionou uma perda de resistência ainda maior quando comparado aos materiais precursores. Na verdade, o decréscimo de resistência foi de 26% em relação à resina virgem, superior ao 50PPv50PPr (8%) e inferior ao 90PPv10POr (31%) na propriedade em questão. Tal resultado pode estar vinculado ao processamento utilizado para o CMP-E. Ainda que as amostras 50PPv50PPr e 90PPv10POr também tenham sido produzidas utilizando extrusora e prensa hidráulica, elas passaram por apenas um ciclo de extrusão, enquanto o CMP-E passou por dois ciclos. O duplo processamento pode ter resultado em uma melhor distribuição e encapsulamento da carga de papelão e da mistura de PPv e PPr. Da mesma forma, Jedy (2017) constatou que CMP com matriz de PP reprocessados até seis vezes apresentam uma melhor dispersão das fibras na matriz, que resultam no aumento da resistência à tração e à flexão, e também na redução da quantidade de água absorvida pelos compósitos em comparação à resina virgem. O CMP-D, por sua vez, apresentou o pior desempenho quanto à resistência à tração, representado por uma perda de 60% da propriedade quando comparado ao PPv. O material, ainda que tenha alcançado inicialmente maior homogeneidade devido à utilização de um misturador termocinético, provavelmente perdeu esta propriedade ao ser processado novamente em moinho de facas, como poderá ser observado nas imagens de MEV (Fig.5.8).

Vale destacar que, mesmo com desempenho inferior à madeira natural utilizada como amostra de controle, o CMP-E se sobressaiu em relação à amostra de CMP comercial, superando-a em 8%. O que indica que o material produzido apresenta propriedades superiores, ainda que em menor expressão, este produto consolidado no mercado. É também o caso da rigidez dos compósitos produzidos, que além de superar a rigidez do CMP-C também superou

a dos materiais precursores, como pode ser observado na Figura 5.4, que apresenta os valores médios do módulo de elasticidade por tração das amostras.

**Figura 5.4 – Módulo de elasticidade na tração das amostragens de controle e compósitos**

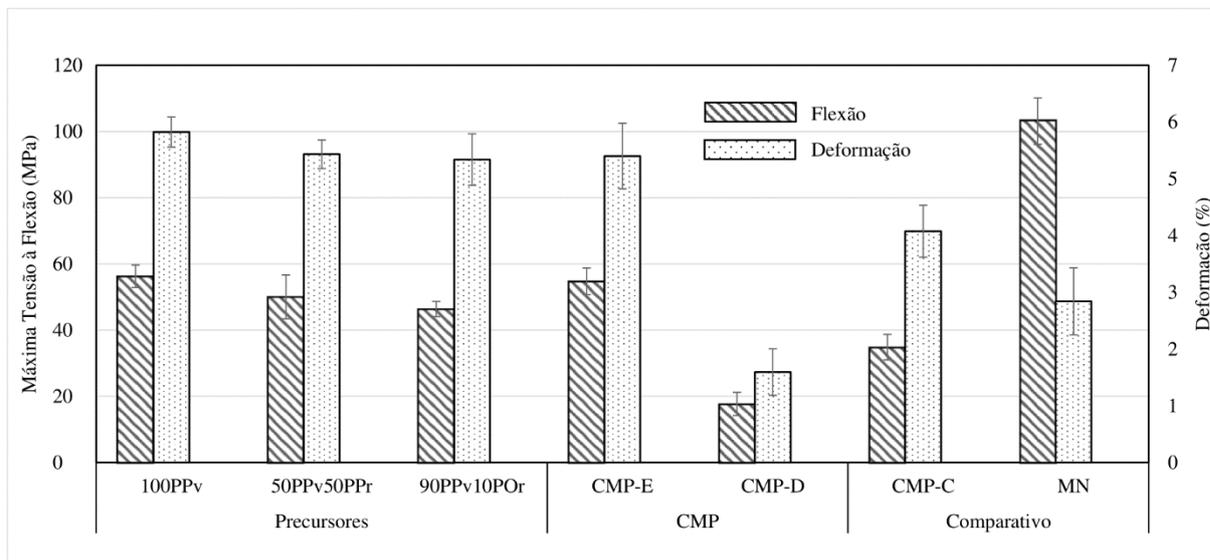


**Fonte: Elaborado pelo autor**

O acréscimo de material reciclado nas amostras 50PPv50PPr e 90PPv10PPr ocasionou uma redução, ainda que sutil, do seu módulo de elasticidade em relação ao polímero virgem, 5% e 3% respectivamente. É esperado que a adição de carga às matrizes poliméricas confira rigidez aos compósitos formados (SABA *et al.*, 2016). Embora o teor de carga da amostra 90PPv10POr não seja suficiente para verificar este comportamento, como mostrado no Capítulo 4, a incorporação simultânea de ambos os materiais residuais, 10% de POr e 45% PPv em massa, provocou um aumento de 14% do módulo de elasticidade tanto no CMP-E quanto no CMP-D. O comportamento das amostras de CMP analisadas condiz com as deformações na tração máxima apresentadas na Figura 5.3, em que os compósitos CMP-E e CMP-D obtiveram os menores índices, logo maior rigidez. Entretanto, ainda que tenham alcançado valores de rigidez equivalentes, o CMP-E apresentou maior valor de deformação, indicando que a mistura por extrusão afeta menos a ductilidade dos compósitos que a mistura por misturador termocinético rotacional. Assim, como as demais amostras, os dois compósitos produzidos não alcançaram módulo de elasticidade próximo ao de uma madeira natural, porém novamente os CMP propostos superaram o CMP-C no que se refere à rigidez.

Na Figura 5.5 são apresentados os valores médios de tensão e deformação na força máxima para o ensaio de flexão das amostragens.

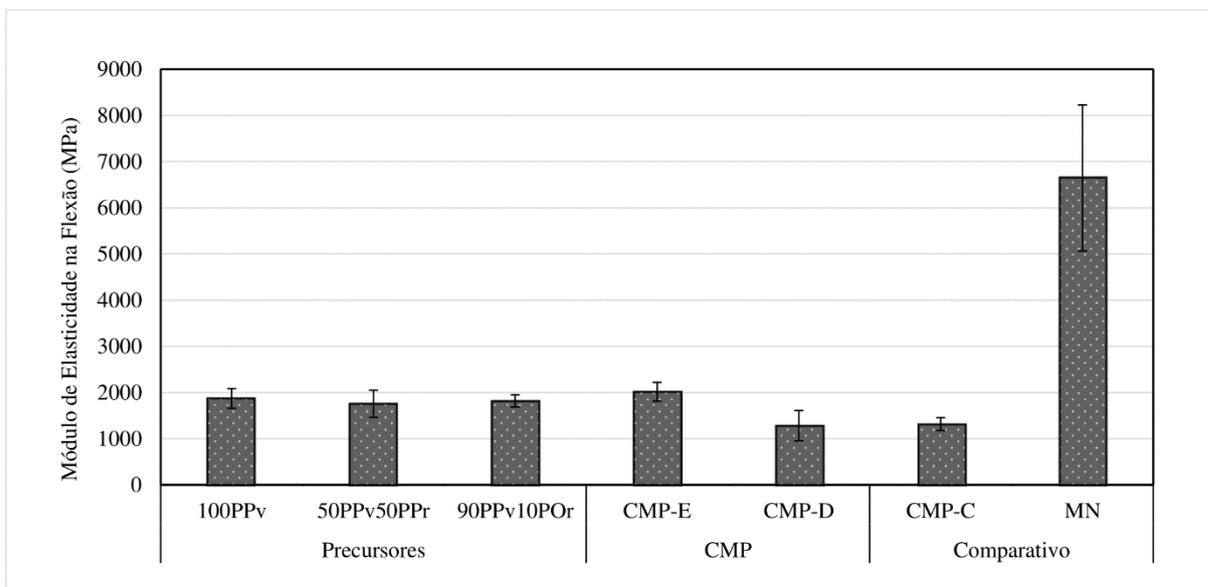
**Figura 5.5 – Resistência à flexão das amostragens de controle e compostos**



**Fonte: Elaborado pelo autor**

Novamente, a adição de material reciclado ao polímero virgem prejudicou seu desempenho mecânico. Porém, diferente do ensaio de resistência à tração, nenhuma das outras amostragens, com exceção da madeira natural, conseguiu superar a resistência à flexão da resina virgem. Ainda assim, a perda de desempenho mecânico foi mínima para o CMP-E (3%) e expressiva para o CMP-D (69%), sendo que no primeiro caso as resistências se equivalem pelo desvio padrão. O CMP-E, que havia superado a amostra comercial em 8% no ensaio de resistência à tração, alcançou resultado ainda mais promissor na flexão: um acréscimo de 57% de resistência em relação ao CMP-C. O composto disponível no mercado também foi superado no que se refere ao módulo de elasticidade na flexão, como pode ser observado na Figura 5.6.

**Figura 5.6 – Módulo de elasticidade na flexão das amostragens de controle e compósitos**



**Fonte: Elaborado pelo autor**

O CMP-E não só obteve módulo superior ao CMP-C como também à todas as outras amostras, com exceção da madeira natural, aumento de 8% em relação ao polímero virgem, e de 53% em relação ao compósito comercial. Percebe-se que em relação ao compósito e às amostras de controle que passaram pelo processo de extrusão, não houve variação significativa do módulo de elasticidade de forma que a presença dos materiais reciclados PPr e POr, separados ou em conjunto, não promoveu alterações significativas nesta propriedade. Por outro lado, o compósito produzido via Drais apresentou uma queda do valor do módulo de 32% em relação à amostra 100PPv. Isso evidencia que não somente a rigidez dos constituintes e a geometria dos CP influenciam a rigidez na flexão (Capítulo 4), como também o tipo de mistura e processamento dos materiais. Ainda que o CMP-E tenha se destacado sem o uso de agentes de acoplamento, suas propriedades mecânicas de flexão e tração podem ser aperfeiçoadas por meio deste tipo de aditivo, que aumenta a adesão interfacial dos polímeros e pode promover uma distribuição mais uniforme da fase dispersa (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017).

E, como mencionado, uma das maiores vantagens associadas aos CMP quando comparados às madeiras naturais, que são altamente hidrofílicas, é sua resistência à absorção, como pode ser observado na Tabela 5.2, que contém os valores médios de absorção e inchamento obtidos a partir das amostragens ensaiadas.

**Tabela 5.5 – Valores médios de Absorção e Inchamento (%)**

<b>Formulação</b>	<b>Absorção (%)</b>	<b>Inchamento (%)</b>
100PPv	0,013 (0,009)	0,000 (0,000)
50PPv50PPr	0,037 (0,048)	0,000 (0,000)
90PPv10POr	0,207 (0,095)	2,062 (2,406)
CMP-E	0,230 (0,110)	0,000 (0,000)
CMP-D	1,668 (0,285)	0,000 (0,000)
CMP-C	0,292 (0,135)	0,357 (0,714)
MN	50,018 (0,6,463)	6,955 (0,910)

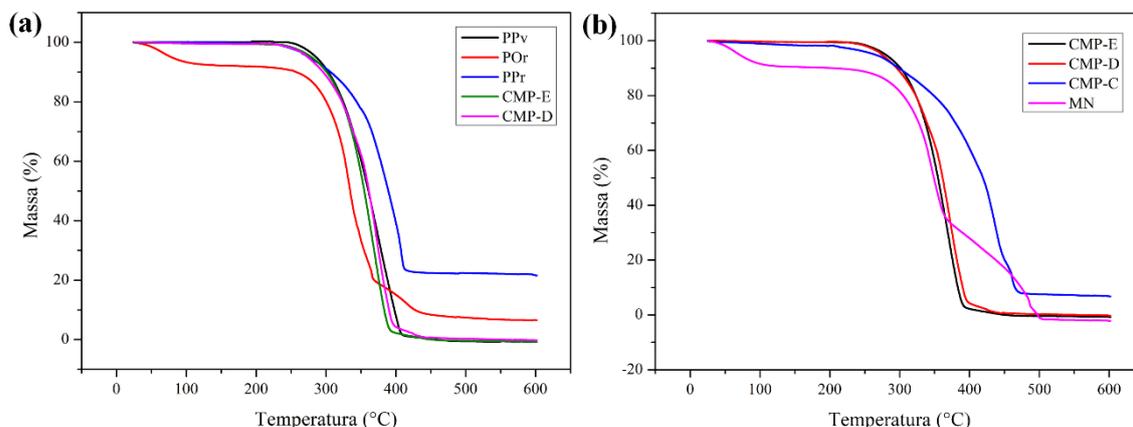
Os valores entre parênteses representam o desvio padrão

Os ensaios físicos configuraram o único momento em que a madeira natural obteve desempenho inferior às demais amostras. O valor médio de absorção alcançado pela amostra MN indica que os CP de madeira absorveram, em 24 horas, massa de água equivalente à metade de sua massa seca, o que causou uma expansão de 7% da espessura dos CP. Este aumento no peso pode provocar uma oneração de custos de transporte, além de dificultar operações de carga e descarga (HENZ; CARDOSO, 2005). Os CMP, por sua vez, não sofreram inchamento e apresentaram valores baixos de absorção quando comparados à madeira natural, sendo o pior desempenho apresentado pelo CMP-D, 1,67% de absorção. O CMP-E mais uma vez superou o CMP comercial, representado pela amostra CMP-C, ainda que por uma pequena diferença. Enquanto o primeiro alcançou absorção de 0,23%, o segundo chegou a 0,29%. Vale destacar que diferente dos CMP produzidos, o CMP-C utilizado como material de referência apresentou instabilidade dimensional, por meio do inchamento de 0,36% em sua espessura. Uma revisão abrangente acerca das pesquisas mais recentes envolvendo CMP mostra que compósitos extrudados absorvem mais água do que aqueles moldados por compressão somente (Capítulo 2). A partir dos resultados obtidos, observa-se que compósitos extrudados e seguidamente submetidos à compressão conseguem reverter este cenário, absorvendo menos água que CMP submetidos apenas à compressão.

As curvas TGA dos CMP produzidos, são apresentadas na Figuras 5.7, em comparação com as matérias-primas (Figura 5.7a) e com as amostras de controle de referência (Figura 5.7b).

De forma complementar, a Tabela 4.3 expõe os valores de Temperatura inicial de degradação térmica ( $T_{inicial}$ ) e Temperatura máxima de degradação térmica ( $T_{máxima}$ ) das amostras.

**Figura 5.7 – Curvas termogravimétricas do CMP-E e CMP-C (a) em comparação com as matérias-primas e (b) em comparação com as amostras de controle de referência**



Fonte: Elaborado pelo autor

**Tabela 4.6 – Valores de degradação térmica das matérias-primas, CMP produzidos e amostras de controle**

Amostra	$T_{inicial}$ (°C)	$T_{máxima}$ (°C)
PPv (pélllet)	233	376
Farinha de papelão (POr)	217	333
Farinha de TNT (PPv)	224	406
100PPv	232	401
50PPv50PPr	231	367
90PPv10POr	232	399
CMP-E	227	370
CMP-D	220	374
CMP-C	203	435
	29	65
MN	222	345
	448	486

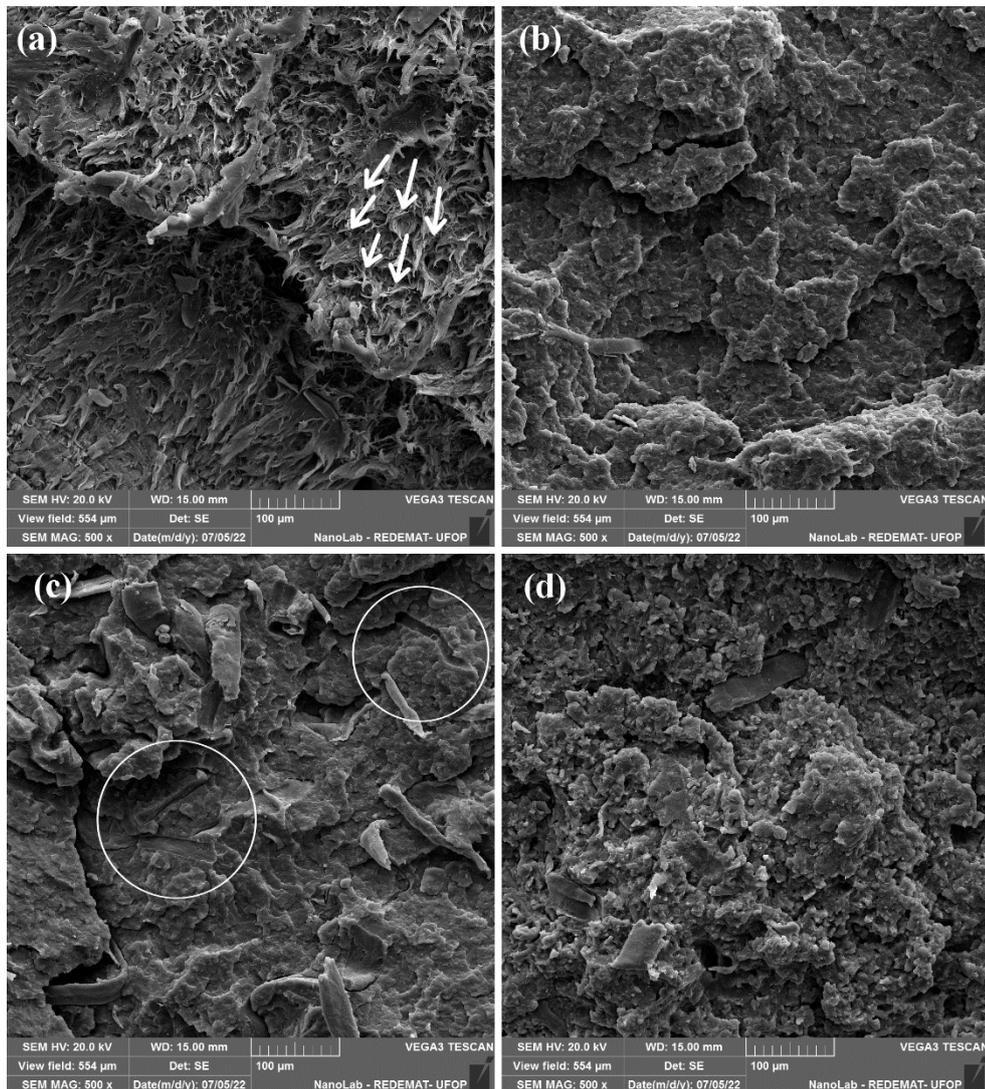
Analisando a Figura 5.7a, observa-se que o POr apresentou durante o início do ensaio, entre 25 e 130°C, pequena perda de massa. Estes valores, assim como na madeira natural, podem estar associados à perda de água ou compostos de baixo peso molecular (URUEÑA, 2018). Sua  $T_{inicial}$  indica que até os 217 °C é seguro utilizar o POr como componente de CMP, sem risco de combustão, tendo em vista que nos processos de extrusão e compressão à quente a quais foram submetidos os CMP, esse nível de temperatura não é atingido. Também foi comprovado o uso seguro do PPr, quanto à sua degradação térmica, tendo o material  $T_{inicial}$  de 224 °C. Diferente do PPv, os materiais pós-consumo apresentaram porcentagem de massa

residual: 7% do POr e 22% do PPr. No que se refere aos compósitos produzidos, seu comportamento de degradação térmica foi próximo ao PPv, material correspondente a 45% de sua massa total. Embora o CMP-D tenha começado a se decompor em torno de 220 °C, 7 °C a menos que o CMP-E, sua taxa de degradação máxima (374 °C) foi maior que sua contraparte extrudada (370 °C). Ainda que os valores tenham sido próximos, a incorporação dos materiais reciclados afetou a temperatura de degradação inicial e máxima do PPv, que eram 233 °C e 376 °C, respectivamente.

Todas as amostras apresentaram somente uma curva significativa de perda de massa, com exceção da MN, onde houve decomposição em três etapas (Figura 5.7b). Neste caso, o primeiro decréscimo de massa, antes dos 100 °C, é atribuído à evaporação da água juntamente com extrativos de baixa massa molar; a segunda perda, após os 250 °C, à degradação dos polissacarídeos, hemicelulose, celulose e a lenta degradação da lignina; enquanto acima dos 350 °C ocorre a degradação de lignina e evaporação dos componentes voláteis formados (POLETTO *et al.*, 2012; KIM *et al.*, 2006). Embora tenha demonstrado desempenho físico e mecânico inferiores quando comparada ao CMP-E, a amostra de CMP-C mostrou maior estabilidade térmica em relação à  $T_{máxima}$  (435 °C), 18% maior que o compósito produzido via extrusão. Entretanto, não se tem conhecimento das matérias-primas utilizadas para a fabricação do compósito comercial.

As Figuras 5.8 e apresentam as imagens obtidas, utilizando MEV, da superfície de fratura após os ensaios de tração dos CP de CMP-E e CMP-D. Para melhor entendimento da imagem, estão dispostas, juntamente com superfície da amostra de CMP-E e CMP-D, as superfícies das amostras 100PPv e 50PPv50PPr. A Figura 5.8 contempla, desta forma, a matriz de PPv (Figura 5.8a), a blenda resultante da matriz de PPv com a adição de PPr (Figura 5.8b); e os compósitos resultantes da incorporação de POr à matriz de PPv com PPr via extrusão (Figura 5.8c) e via homogeneização termocinética (Figura 5.8d).

**Figura 5.8 – Imagens de MEV da superfície de fratura após ensaio de tração das amostras (a) 100PPv, (b) 50PPv50PPr, (c) CMP-E e (d) CMP-D**



**Fonte: Elaborado pelo autor**

O aspecto alongado da fratura de PPv nas direções indicadas confirma o maior valor de deformação encontrado nos testes de tração (Figura 5.3) e ressalta a ductilidade da resina virgem. Parte desta ductilidade é perdida com a adição de PPr, visto que não há estiramento da blenda na fratura (Figura 5.8b). Finalmente, na imagem do CMP-E (Figura 5.8c) podem ser observadas algumas partículas de POr expostas e também recobertas pela matriz, assim como cavidades e vazios na superfície de fratura com o mesmo formato das partículas (regiões circuladas). Isto indica que ocorreu na ruptura um arrancamento das partículas de POr, o que indica uma ligação interfacial fraca entre a carga e a matriz, que pode ser melhorada com o uso de um aditivo ou agente de acoplamento (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017). Zhou *et*

*al.* (2019) também identificaram modo de falha de CMP dominado por danos por arrancamento, enquanto outros autores identificaram quebra da fibra e descolamento da interface (ADHIKARY; PANG; STAIGER, 2008; OU *et al.*, 2010). Embora haja a ocorrência destes vazios e cavidades na superfície de fratura do CMP-E, as partículas de POr estão bem embutidas na matriz de PPv e PPr, quando comparadas com o CMP-D (Figura 5.8d), em que as partículas de POr aparentam estar desconexas da matriz. Isso indica uma ligação interfacial ainda pior, o que justifica o desempenho mecânico inferior da amostra em questão nos ensaios de tração e flexão. O maior número de poros explica ainda o comportamento de maior absorção do CMP-D, e pode evidenciar uma rede interna de microfraturas que também pode afetar as propriedades mecânicas do compósito. A presença de grumos na matriz pouco homogênea do CMP-D pode estar relacionada ao aspecto pulverulento da mistura antes da moldagem, que ocasionou ligações mais fracas entre as partículas. Isso por que como as duas chapas da prensa têm o molde metálico como limite de compressão, é possível que as partículas finas sobressalentes tenham se espalhado pela parte exterior do molde, impedindo que o material em seu interior receba totalmente a pressão aplicada devido aos vazios entre os finos, o que não ocorre com os grãos peletizados do CMP-E, que tem comprimento e diâmetro maiores que a espessura do molde.

#### **5.4 Conclusão**

As propriedades mecânicas, físicas, térmicas e microestruturais de CMP produzidos via extrusão e homogeneização termocinética, seguidas por compressão a quente, foram analisadas para determinar o potencial de aplicação de resíduos da pandemia de covid-19, mais especificamente POr e PPr, em compósitos à base de PPv. Tanto o POr quanto o PPr mostraram-se aptos a serem utilizados como carga de enchimento e matriz, respectivamente, e de forma simultânea, desde que os materiais sejam processados em temperaturas abaixo de 217 °C, quando ocorrem as primeiras degradações do papelão.

Com exceção da resistência à tração, o CMP-E apresentou resultados superiores de resistência e rigidez quando comparado com a blenda e compósitos precursores e também com o CMP-D, ainda que a análise de MEV tenha evidenciado uma ligação interfacial fraca entre a carga e a matriz. O uso de agentes de acoplamento pode melhorar significativamente esta propriedade e consequentemente a resistência à tração e à flexão de ambos os compósitos,

promovendo uma ligação interfacial aprimorada e transferência de tensão mais eficiente pela interface.

Além dos piores resultados nos testes de resistência mecânica e física, o CMP-D demonstrou uma ligação interfacial precária entre as matérias-primas, como indicado pelas imagens de MEV. A utilização do moinho de facas após o processo de mistura termocinética pode ter inutilizado as propriedades de homogeneização da pasta formada na Drais. Ainda assim, o material homogeneizado apresentou uma cor predominante e uniforme, em comparação com o CMP-E, em que as partículas de POr ficam notoriamente visíveis na matriz de PPv e PPr.

No que se refere às amostras de controle utilizadas como referência, a madeira natural superou as propriedades mecânicas de todas as amostras ensaiadas. Entretanto, os compósitos produzidos apresentaram melhor estabilidade térmica e propriedades físicas, com destaque para o inchamento não constatado e os valores mínimos de absorção. Em contrapartida, a amostra CMP-C disponível no mercado exibiu maior estabilidade térmica, com temperatura de degradação máxima superior em 18% ao CMP-E. Como os materiais base da amostra comercial não são conhecidos, a técnica de Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) pode ser aplicada em trabalhos futuros para a investigar sua composição química, fornecendo evidências que justifiquem sua resistência térmica superior. Ainda assim, o CMP-E superou o CMP-C no que diz respeito às propriedades mecânicas de tração e flexão e também às propriedades físicas de absorção e inchamento. Sugere-se, desta forma, que o CMP-E atenderia e superaria aos requisitos destas propriedades se comparado ao CMP disponível no mercado.

Desta forma, o PPr proveniente de máscaras de TNT e o POr proveniente de embalagens para mercadorias, resíduos cuja geração foi aumentada durante a pandemia de Covid-19, revelaram-se uma alternativa de elevado potencial para a confecção de CMP. Tais compósitos poderão ser utilizados comercialmente em substituição às madeiras naturais ao mesmo tempo em que reduzem os impactos gerados pelo acúmulo dos materiais residuais no meio ambiente e auxiliam na renda de catadores e cooperativas.

## 5.5 Referências Bibliográficas

ABPO Associação Brasileira do Papelão Ondulado. Boletim Estatístico 2020. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.abpo.org.br/boletim-estatistico>. Acesso em: 07 fev. 2021.

ADHIKARY, Kamal B.; PANG, Shusheng; STAIGER, Mark P. Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites Part B: Engineering*, v. 39, n. 5, p. 807-815, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D638 – 14: Standard test method for Tensile properties of plastics. West Conshohocken, PA, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D790-07: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. West Conshohocken, PA: Astm, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020. São Paulo: ABRELPE, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021. São Paulo: ABRELPE, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14257: Papel e cartão - Tubetes - Determinação da umidade - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9486: Compensado – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9535: Compensado - Determinação do inchamento - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

BASALP, Dildare et al. Utilization of Municipal Plastic and Wood Waste in Industrial Manufacturing of Wood Plastic Composites. *Waste and Biomass Valorization*, [s. l.], v. 11, n. 10, p. 5419–5430, 2020.

BOCHKOV, I. et al. Polypropylene composites wear resistance properties due to spelt and oat grain husks short fiber preparation technology. In: *BALTTRIB'2019: proceedings of X international scientific conference*, Vytautas Magnus University, Agriculture Academy, Kaunas, Lithuania, 14-16 November 2019, 2019, p. 1-6. 2019.

BRASKEM. Folha de dados - Polipropileno PG35L. Braskem, 2019. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/cms/Principal/ModuloProduto/DownloadFolhaDados?idFolha=HECYK KCesNg=&idIdioma=YrItVniimrc=&idTipo=YrItVniimrc=&idProduto=yN9iNvIyyt4=&pasta=T46E Dfq+gkM=&guid=dcf901ab-82db-46e8-a1db-dd69fa08b458>. Acesso em: 30 jun. 2022.

CABRAL, Stênio Cavalier et al. Características comparativas da madeira plástica com a madeira convencional. *Revista Científica Vozes dos Vales*, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 1–20, 2016.

CAMARGO, Maria Cristina de et al. Eficácia da máscara facial (TNT) na população para a prevenção de infecções por coronavírus: revisão sistemática. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 25, p. 3365-3376, 2020.

CARDARELLI, François. *Materials Handbook A Concise Desktop Reference*. 3aed. [S. l.]: Springer, 2018.

CARUS, M et al. WPC/NFC Market Study 2014-10 (Update 2015-06): Wood-Plastic Composites (WPC) and Natural Fibre Composites (NFC): European and Global Markets 2012 and Future Trends in Automotive and Construction. Market study by nova Institut GmbH, Hürth, DE, available under [www.biobased.eu/markets](http://www.biobased.eu/markets), [s. l.], v. 5, n. 14, p. 1–16, 2015.

CAVALCANTI, Washington Moreira; MAZIERO, Rômulo; FERNANDES, Maria Aparecida. Madeira Plástica Como Alternativa Para Utilização Do Glicerol Resultante Do Processo De Produção De Biodiesel. XXII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVIII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VIII Encontro de Iniciação à Docência - Universidade do Vale do Paraíba, 2018.

CHEN, Bo et al. Wood Plastic Composites from the Waste Lignocellulosic Biomass Fibers of Bio-Fuels Processes: A Comparative Study on Mechanical Properties and Weathering Effects. *Waste and Biomass Valorization*, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 1701–1710, 2020.

CHUN, Koay Seong et al. Wood plastic composites made from post-used polystyrene foam and agricultural waste. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, v. 32, n. 11, p. 1455-1466, 2019.

ESKANDER, Samir B.; TAWFIK, Magda E.; TAWFIC, Medhat L. Mechanical, flammability and thermal degradation characteristics of rice straw fiber-recycled polystyrene foam hard wood composites incorporating fire retardants. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 132, n. 2, p. 1115-1124, 2018.

FISCHER, Emma P. et al. Low-cost measurement of face mask efficacy for filtering expelled droplets during speech. *Science Advances*, [s. l.], v. 6, 2 set. 2020. DOI: 10.1126/sciadv.abd3083. Disponível em: <https://advances.sciencemag.org/content/6/36/eabd3083>. Acesso em: 7 fev. 2021.

HENZ, Gilmar P.; CARDOSO, Flávio B. Absorção de água e proliferação de fungos em madeira de Pinus usada como embalagem para hortaliças. *Horticultura Brasileira*, v. 23, p. 138-142, 2005.

HUANG, Lijie et al. Performance of waste-paper/PETG wood-plastic composites. *AIP Advances*, [s. l.], v. 8, n. 5, 2018.

JEDYN, Felipe Gonçalves. Preparação e caracterização de compósitos reprocessados de matriz de polipropileno reforçados por serragem. 2017. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Área de concentração Manufatura. Curitiba, Paraná, 2017.

KESKISAARI, Anna; KÄRKI, Timo. The use of waste materials in wood-plastic composites and their impact on the profitability of the product. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 134, p. 257-261, 2018.

KIELING, A.; PEREIRA, S.; DOS SANTOS, Maria Cristina. Compósitos de madeira plástica: considerações gerais. *Scientia Amazonia*, v. 8, n. 1, p. B1-B14, 2019.

- KIM, Hee-Soo et al. The effect of types of maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) on the interfacial adhesion properties of bio-flour-filled polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 38, n. 6, p. 1473-1482, 2007.
- KIM, Hee-Soo et al. Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content. *Thermochimica acta*, v. 451, n. 1-2, p. 181-188, 2006.
- KLYOSOV, Anatole A. *Wood-plastic composites*. John Wiley & Sons, 2007.
- LINHARES, Henrique. O que é TNT – Tecido não Tecido. *Só Hélices*, 2020. Disponível em: <http://sohelices.com.br/o-que-e-tnt-tecido-nao-tecido/>. Acesso em: 23 mai. 2022.
- MELLO, Daniel. Comércio eletrônico e delivery aumentam consumo de embalagens. Agência Brasil, 2020. Disponível em: <https://agenciabrasil.etc.com.br/economia/noticia/2020-10/comercio-eletronico-e-delivery-aumentam-consumo-de-embalagens>. Acesso em: 08 out. 2021.
- OU, Rongxian et al. Reinforcing effects of Kevlar fiber on the mechanical properties of wood-flour/high-density-polyethylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 41, n. 9, p. 1272-1278, 2010.
- POLETTO, Matheus et al. Materials produced from plant biomass: part II: evaluation of crystallinity and degradation kinetics of cellulose. *Materials Research*, v. 15, p. 421-427, 2012.
- PORTELA JUNIOR, Adauto de Brito et al. A MADEIRA PLÁSTICA E SEUS EFEITOS E VANTAGENS PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. In: *Enaproc*, v. 1, n. 1, 2019. p. 10–12.
- RAGAERT, Kim; DELVA, Laurens; VAN GEEM, Kevin. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste management*, v. 69, p. 24-58, 2017.
- RUEÑA, Gustavo Adolfo Duarte et al. EXTRAÇÃO DE NANOCELULOSE DE RESÍDUOS DE PAPELÃO. *Outubro*, v. 23, p. 25, 2018.
- SABA, Naheed et al. Recent advances in epoxy resin, natural fiber-reinforced epoxy composites and their applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 35, n. 6, p. 447-470, 2016.
- SANTOS, A. R. et al. Propriedades dos Compósitos Madeira-Plástico e seu uso na construção de decks em substituição às madeiras naturais: uma revisão. In: *ENCONTRO LATINO-AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS*, 4, 2021, Salvador, BA. Anais do Encontro Latino-americano e Europeu sobre edificações e comunidades sustentáveis. Salvador, BA: Universidade Federal da Bahia-UFBA, Faculdade de Arquitetura-FAUFBA, 2021. 1378 p. Evento realizado online, de 10 a 12 de novembro de 2021.
- SCHEEREN, Denise; MÄHLMANN, Cláudia Mendes; MÜLLER, Franciéli. 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.
- URUEÑA, Gustavo Adolfo Duarte et al. EXTRAÇÃO DE NANOCELULOSE DE RESÍDUOS DE PAPELÃO. *Outubro*, v. 23, p. 25, 2018.
- YADAV, Sumit Manohar; LUBIS, Muhammad Adly Rahandi; SIHAG, Kapil. A Comprehensive Review on Process and Technological Aspects of Wood- Plastic Composites. *Jurnal Sylva Lestari*, [s. l.], v. 9, n. May, p. 329–356, 2021.

ZHANG, Hui-hui; CUI, Yihua; ZHANG, Zhidan. Chemical treatment of wood fiber and its reinforced unsaturated polyester composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, v. 19, n. 1, p. 18-24, 2013.

ZHOU, Yonghui et al. A circular economy use of recovered sludge cellulose in wood plastic composite production: Recycling and eco-efficiency assessment. *Waste Management*, v. 99, p. 42-48, 2019.

ZULKIFLI, N. Izzati et al. Mechanical properties and failure modes of recycled polypropylene/microcrystalline cellulose composites. *Materials & Design*, v. 69, p. 114-123, 2015.

# CAPÍTULO 6

---

Considerações Finais

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Amplio conhecimento teórico pôde ser obtido a partir da revisão sistemática de literatura realizada, em que foi demonstrada a versatilidade de composição e produção dos CMP. É evidente que esta composição deve ser combinada a um método de produção condizente, devido às limitações de temperatura que influenciam principalmente as cargas de enchimento. A estratégia de investir na produção de CMP torna-se ainda mais inovadora com a possibilidade de produzir amostras a partir de materiais residuais que, diante da pandemia, tiveram sua produção, consumo e conseqüente descarte intensificados. Mesmo com o fim da emergência de saúde da Covid, acredita-se que produtos compostos pelas matérias-primas residuais investigadas continuarão sendo consumidos, e provavelmente em maior escala, dado o crescimento populacional, as mudanças de hábito geradas e a necessidade de medidas de segurança. Os métodos propostos para o preparo e processamento dos materiais se apresentaram viáveis e eficientes. Tanto o POr quanto o PPr mostraram-se aptos a serem utilizados na produção de blendas e compósitos poliméricos à base de PPv, desde que os materiais sejam processados em temperaturas abaixo de 217 °C no caso em que seja utilizado POr e 224 °C nos casos em que seja utilizado PPr. Dentre as blendas produzidas, destacou-se a amostra 50PPv50PPr, que apresentou propriedades de resistência próximas às do PPv (perda de 8% na resistência à tração e de 11% na resistência à flexão) ainda que metade do PP comercial tenha sido substituída por PP pós-consumo em sua composição. Dentre os compósitos utilizando POr incorporado ao PPv, destacaram-se as amostras 90PPv10POr e 95PPv5POr. Ainda que amostra com 10% de POr tenha apresentado valores de resistência mecânica inferiores à amostra com 5% do material, e valores de absorção e inchamento superiores, ela se sobressaiu quanto à rigidez e proporcionou um maior reaproveitamento do resíduo de papelão. Além disso, o aspecto visual alcançado pelos compósitos utilizando POr e PPv foi o mais próximo da madeira natural, o que pode facilitar sua aceitação no mercado. Confirmada a aplicabilidade dos resíduos de TNT e papelão juntamente com o PP, os materiais foram testados em conjunto, seguindo uma proposição de dosagem baseada nos experimentos anteriores. Isso propiciou o surgimento de dois CMP originais, com destaque para o CMP-E, um compósito sustentável, exequível e com condições de competir no mercado. Isso porque o CMP-E apresentou resultados superiores de resistência, rigidez e estabilidade dimensional e térmica quando comparado aos compósitos precursores e a um CMP consolidado no mercado, ainda que tenha apresentado uma ligação interfacial fraca entre a carga e a matriz. Para melhorar esta propriedade pode-se recorrer à

aplicação de agentes de acoplamento que promovam uma transferência de tensão mais eficiente por meio da interface. Desta forma, os CMP com resíduos pandêmicos se mostraram uma promissora alternativa para solucionar o problema da poluição de resíduos plásticos à medida em que aumentam a vida útil de aterros sanitários e contribuem para a diminuição da exploração de madeiras naturais para fins comerciais, tornando os processos construtivos mais sustentáveis e ecológicos.

Seguem como sugestões para trabalhos futuros: avaliar o efeito da adição de agentes compatibilizantes nas propriedades dos CMP; caracterizar quimicamente os resíduos de PPr, POr; Combinar os dois processos de mistura utilizados (homogeneização termocinética e extrusão) em um único compósito de forma que a mistura seja feita em duas etapas: primeiramente via Drais e, em um segundo momento, via extrusora após a pasta homogeneizada passar por moinho de facas; utilizar outros tipos de EPI de TNT como fonte de PPr; e utilizar algum produto mineral como pigmento, de preferência residual, para facilitar a aceitação do produto no mercado em razão dos seu aspecto visual e memória afetiva associada aos produtos de origem natural.

