

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE
MADEIRA-PLÁSTICO COM RESÍDUOS DE MARCENARIA**

PAULA GEORG DORNELLES

ORIENTADOR: DR. CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

BRASÍLIA / DF: NOVEMBRO / 2024

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE MADEIRA-
PLÁSTICO COM RESÍDUOS DE MARCENARIA**

PAULA GEORG DORNELLES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA FLORESTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE.**

APROVADA POR:

**Cláudio Henrique Soares Del Menezzi, Doutor – UnB
(ORIENTADOR)**

**Ailton Teixeira do Vale, Doutor – UnB
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Lina Bufalino, Doutora – UFRA
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**Darci Alberto Gatto, Doutor – UFSM
(EXAMINADOR EXTERNO - suplente)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 08 de NOVEMBRO de 2024.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

DD713pp Dornelles, Paula Georg
Produção e Caracterização de Compósitos de
Madeira-plástico com Resíduos de Marcenaria / Paula Georg
Dornelles; orientador Cláudio Henrique Soares Del Menezzi.
-- Brasília, 2024.
58 p.

Dissertação(Mestrado em Ciências Florestais) --
Universidade de Brasília, 2024.

1. Compósitos madeira-plástico. 2. Resíduos de madeira.
3. Plásticos. 4. Reciclagem. I. Del Menezzi, Cláudio
Henrique Soares, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram para a realização desta dissertação.

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, professor Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi, por sua orientação, paciência e valiosas sugestões ao longo do processo.

Agradeço ao meu amigo e irmão Fred, que sempre insistiu e me incentivou a fazer o mestrado nas Ciências Florestais.

Agradeço à Annie e Rossana, amigas que a pós-graduação me deu. Obrigada por toda a ajuda, parceria, alegria em momentos difíceis, pelas ideias compartilhadas e pela amizade. Sem vocês esse caminho teria sido muito mais difícil.

Agradeço também ao professor Thiago Doca, do Departamento de Engenharia Mecânica, que possibilitou a realização dos meus ensaios mecânicos. Agradeço à Karoline Gusmão, aluna de doutorado da Engenharia Mecânica, pela paciência, ideias e explicações compartilhadas.

Finalmente, sou eternamente grata à minha família. Ao meu pai e minha mãe, pela base de valores e pela confiança depositada em mim, sempre acreditando no meu potencial e me apoiando incondicionalmente em todas as fases dessa jornada. À Lala e Rafa, por estarem ao meu lado, oferecendo sempre uma palavra de incentivo, e aos meus sobrinhos, Mig e Samuca, que, com sua alegria trouxeram leveza aos meus dias de estudo. Obrigada por serem minha fortaleza e meu suporte nos momentos em que mais necessitei.

RESUMO

O desenvolvimento de materiais a partir de resíduos de marcenarias pode contribuir significativamente para a redução de impactos ambientais, dado que esses resíduos, quando descartados de forma inadequada, podem causar sérios danos ao meio ambiente. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito da adição de resíduos de marcenaria nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de madeira-plástico com matriz polimérica de Polipropileno (PP) e Polietileno de Alta Densidade (PEAD). Foram utilizados resíduos de madeiras variadas e MDF (*Medium Density Fiberboard*) nas proporções de 15 e 30 % combinado com PP e PEAD. Os compósitos foram produzidos por extrusão seguido da injeção dos corpos de prova, que foram submetidos a ensaios físicos (absorção de água e densidade) e mecânicos (análise mecânica dinâmica, dureza e tração). Os resultados encontrados neste estudo revelaram que os compósitos absorveram pouca água (menos de 2 %) e quanto maior foi o teor de resíduos maior foi a densidade, em alguns casos houve um aumento de mais de 86 % em comparação ao material virgem. Já do ponto de vista mecânico, o MDF mostrou-se mais eficiente em aumentar o módulo de elasticidade e a dureza dos compósitos, especialmente na proporção a 30 % quando combinado com o PP. Sendo assim, a utilização de resíduos de marcenaria em compósitos de madeira-plástico oferece uma alternativa viável e sustentável para o aproveitamento de resíduos industriais, podendo ser utilizado em aplicações variadas.

Palavras-chave: plásticos, resíduos de madeira, compósitos madeira-plástico, reciclagem

ABSTRACT

The development of materials from woodworking waste can reduce its environmental impact because improper disposal can cause serious damage to the environment. In this context, the present study aimed to evaluate the effect of carpentry waste addition on the physical and mechanical properties of wood-plastic composites with a polymer matrix of Polypropylene (PP) and high-density polyethylene (HDPE). Waste from various woods and MDF (Medium Density Fiberboard) in proportions of 15% and 30% combined with PP and HDPE were used. The composites were produced by extrusion followed by injection of the specimens, which were subjected to physical (water absorption and density) and mechanical (dynamic mechanical analysis, hardness and tensile) tests. The results revealed that the composites absorbed little water (less than 2%) and the higher the waste content, the higher the density; in some cases, there was an increase of more than 86% compared to the virgin material. From a mechanical point of view, MDF proved to be more efficient in increasing the modulus of elasticity and hardness of the composites, especially in the proportion of 30% when combined with PP. Therefore, the use of carpentry waste in wood-plastic composites offers a viable and sustainable alternative for the use of industrial waste and can be used in various applications.

Keywords: plastics, wood waste, wood-plastic composites, recycling

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	13
1.1.1 Objetivo geral	13
1.1.2 Objetivos específicos	13
1.2 Hipótese	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Resíduos	14
2.2 Compósitos madeira-plástico	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 Preparo do Material	20
3.2 Fabricação dos Compósitos	21
3.3 Propriedades Físicas	24
3.4 Análise Mecânica Dinâmica – DMA	25
3.5 Propriedades Mecânicas	27
3.5.1 Ensaio de Dureza	27
3.5.2 Ensaio de Tração	27
3.6 Análise estatística	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 Fabricação dos compósitos	30
4.2 Absorção de água	30
4.3 Perfil de densidade longitudinal	31
4.4 Análise Mecânica Dinâmica	32
4.5 Propriedades Mecânicas	38
5. CONCLUSÕES	42
REFERÊNCIAS	43
APÊNDICE A	47
APÊNDICE B	52
APÊNDICE C	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Formulação dos compósitos madeira-plástico	21
Tabela 3.2 - Parâmetros para extrusão dos compósitos onde Z = zona de aquecimento e Vr = velocidade das roscas	23
Tabela 3.3 - Parâmetros de injeção dos compósitos onde Pi = pressão de injeção; ti = tempo de injeção; Pr = pressão de recalque; tr = tempo de recalque; Tm = temperatura do molde e Tc = temperatura do cilindro	23
Tabela 4. 1 - Densidade média dos compósitos.....	31
Tabela 4. 2 - Propriedades mecânicas dos compósitos submetidos ao ensaio de tração	38
Tabela C.1 - Análise de Variância - Absorção de Água dos compósitos com matriz em PP, n = 3.....	57
Tabela C.2 - Análise de Variância - Absorção de Água dos compósitos com matriz em PEAD, n = 3.....	57
Tabela C.3 - Análise de Variância - MOE dos compósitos com matriz em PP, n = 5.....	57
Tabela C.4 - Análise de Variância - MOE dos compósitos com matriz em PEAD, n = 5	57
Tabela C.5 - Análise de Variância - Resistência à tração dos compósitos com matriz em PP, n = 5.....	58
Tabela C.6 - Análise de Variância - Resistência à tração dos compósitos com matriz em PEAD, n = 5.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Perfis fabricados com WPC – fonte: (KLYOSOV, 2007)	18
Figura 3.1 - Resíduos de madeira e MDF utilizados nos compósitos	20
Figura 3.2 - Composição química do PEAD e PP – fonte: (CRQ, 2024)	21
Figura 3.3 - Etapas de produção dos compósitos	22
Figura 3.4 - Exemplos de corpos de prova: a) corpo de prova para os ensaios de absorção de água, perfil de densidade, DMA e dureza; b) corpo de prova para o ensaio de tração	23
Figura 3.5 - Equipamento para medição do perfil de densidade	25
Figura 3.6 - Equipamento para o ensaio DMA.....	26
Figura 3.7 - Corpo de prova no ensaio DMA utilizando o modo 3-point bending.....	26
Figura 3.8 - Ensaio de micro dureza Vickers com carga de 0,1 Kgf.....	27
Figura 3.9 - Equipamento de ensaio de tração com célula de carga de 5 KN.....	28
Figura 4.1 - Absorção de água dos compósitos após 24h (%)	30
Figura 4.2 – Perfis de densidade de compósitos com matriz em PP e resíduo de MDF. a) PP 100%, b) MDFPP-15 e c) MDFPP-30	32
Figura 4.3 - Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de madeira: a) matriz em PP e b) matriz em PEAD	34
Figura 4.4 - Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de MDF: a) matriz em PP e b) matriz em PEAD	35
Figura 4.5 - Curvas tan d dos compósitos com resíduo em madeira: a) matriz em PP e b) matriz em PEAD.....	37
Figura 4.6 - Curvas tan d dos compósitos com resíduo em MDF: a) matriz em PP e b) matriz em PEAD	38
Figura A. 1 - Perfil de densidade PP100	47
Figura A. 2 - Perfil de densidade PEAD100	47
Figura A. 3 - Perfil de densidade WPP15	48
Figura A. 4 - Perfil de densidade WPP30	48
Figura A. 5 - Perfil de densidade WPEAD15	49
Figura A. 6 - Perfil de densidade WPEAD30	49
Figura A. 7 - Perfil de densidade MDFPP15.....	50
Figura A. 8 - Perfil de densidade MDFPP30.....	50
Figura A. 9 - Perfil de densidade MDFPEAD15.....	51

Figura A. 10 - Perfil de densidade MDFPEAD30.....	51
Figura B. 1 - Gráfico Resistência à tração x deformação do PP100.....	52
Figura B. 2 - Gráfico Resistência à tração x deformação do WPP15	52
Figura B. 3 - Gráfico Resistência à tração x deformação do WPP30	53
Figura B. 4 - Gráfico Resistência à tração x deformação do MDFPP15.....	53
Figura B. 5 - Gráfico Resistência à tração x deformação do MDFPP30.....	54
Figura B. 6 - Gráfico Resistência à tração x deformação do PEAD100.....	54
Figura B. 7 - Gráfico Resistência à tração x deformação do WPEAD15	55
Figura B. 8 - Gráfico Resistência à tração x deformação do WPEAD30	55
Figura B. 9 - Gráfico Resistência à tração x deformação do MDFPEAD15.....	56
Figura B. 10 - Gráfico Resistência à tração x deformação do MDFPEAD30.....	56

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Comparação entre as pesquisas iniciais e pesquisas recentes sobre WPC	17
Quadro 4.1 - Tendência dos resultados das propriedades mecânicas ao se adicionar resíduos de marcenaria no compósito.....	39

1. INTRODUÇÃO

A indústria madeireira produz grandes volumes de resíduos, o que acarreta desafios ambientais importantes. Esses materiais, provenientes principalmente de serrarias e do processamento da madeira, muitas vezes são descartados de maneira inadequada, contribuindo para a poluição e para o desperdício de recursos.

Uma alternativa viável para o destino desse resíduo é a produção de compósitos de madeira-plástico ou WPCs (*wood-plastic composites*), uma vez que possuem um baixo custo econômico e energético e facilidade de produção, além de uma maior sustentabilidade por terem alto potencial de reciclagem (ELSHEIKH et al., 2022; HOFFMANN et al., 2017; MORITZER; HOPP, 2017). Os compósitos madeira-plástico são uma classe dos compósitos inovadora que utiliza madeira e uma matriz polimérica termoplástica em sua fabricação através de extrusão e moldagem por injeção ou compressão (CHAN et al., 2018; CORREA et al., 2003; FLORES-HERNÁNDEZ et al., 2017).

Nos WPCs, o componente polimérico termoplástico confere dureza ao compósito, devido à sua estrutura molecular, e a madeira confere resistência e rigidez, em função de sua estrutura fibrosa, sendo capaz de ser produzido em vários tamanhos, formatos e cores com diversas aplicações. (FLORES-HERNÁNDEZ et al., 2017a; SAIN; PERVAIZ, 2008) Além disso, os WPCs absorvem menos água, possuem uma maior estabilidade dimensional, maior resistência ao intemperismo e à corrosão química quando comparados a madeira serrada (RATANAWILAI; TANEERAT, 2018; REJEB et al., 2021).

Nos últimos anos, os WPCs tornaram-se mais populares devido à sua alta durabilidade, baixa manutenção e compatibilidade ambiental em comparação com os produtos de madeira tradicionais (KESKISAARI; KÄRKI, 2018). O desenvolvimento de WPCs tem sido impulsionado pela crescente demanda por produtos sustentáveis e pela necessidade de reutilização dos resíduos gerados pela indústria de processamento de madeira (BASALP et al., 2020; FLORES-HERNÁNDEZ et al., 2017; WECHSLER; HIZIROGLU, 2007). De acordo com Moritzer e Hopp (2017), em 2012 produziu-se mais de dois milhões de toneladas de WPCs no mundo.

O uso de resíduos de madeira na formulação de WPCs ajuda a reduzir o impacto ambiental, incentivando práticas sustentáveis e agregando valor a recursos

renováveis. (DE BRITO; TRINDADE, 2023) A madeira tem um longo histórico como material de enchimento de baixo custo na indústria de plásticos para aumentar a resistência e rigidez dos termoplásticos ou reduzir os custos das matérias-primas (CHOWDHURY et al., 2022). A incorporação de MDF em WPCs resulta em compósitos com propriedades mecânicas melhoradas, com maior resistência e rigidez e contribui para a resistência do compósito à umidade, tornando-o mais resistente a condições ambientais adversas (GOMES et al., 2017; SCHEEREN et al, 2020).

Os estudos em compósitos de madeira-plástico têm focado na combinação de um polímero e apenas um tipo de fibra de madeira. Não há registros na literatura científica que investiguem compósitos WPCs utilizando resíduos compostos por uma mistura de diferentes espécies de madeira.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar os efeitos da adição de resíduos de marcenaria nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos com matriz polimérica de polipropileno (PP) e polietileno de alta densidade (PEAD).

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar os efeitos de diferentes resíduos (serragem misturada ou MDF) nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos.
- Avaliar qual a proporção de resíduos confere melhores propriedades físicas e mecânicas aos compósitos.

1.2 Hipótese

É possível utilizar resíduos de marcenaria para a produção de compósitos com propriedades físicas e mecânicas adequadas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Resíduos

Resíduos podem ser considerados subprodutos de processos industriais que, se não forem adequadamente gerenciados, podem representar um problema ambiental significativo. (CORREA et al., 2003)

Os resíduos gerados pela indústria moveleira são uma preocupação devido à quantidade e diversidade de materiais envolvidos no processo de fabricação de móveis. Esses resíduos podem ser sobras de madeira de diferentes tipos, como serragem, lascas e aparas, resultantes das operações de corte, moldagem e acabamento durante a produção de móveis (SANTOS et al., 2021). Além disso, componentes como painéis de fibras, partículas, aglomerados e laminados, muito utilizados na fabricação de móveis, geram resíduos que precisam ser gerenciados adequadamente para minimizar o impacto ambiental (KIELING et al, 2019).

A reutilização desses resíduos da indústria moveleira é um campo de pesquisa crescente visando à sustentabilidade. A transformação de resíduos de madeira em compósitos madeira-plástico oferece uma alternativa viável para a valorização desses materiais descartados (DE BRITO; TRINDADE, 2023).

O gerenciamento eficaz dos resíduos da indústria moveleira não se limita apenas à sua reutilização em novos produtos. É importante a melhoria dos processos de reciclagem e tratamento de resíduos para garantir que esses materiais possam ser reutilizados de maneira segura e eficiente na cadeia produtiva. Isso envolve desde a separação correta na fonte até a implementação de tecnologias avançadas de reciclagem que maximizam o aproveitamento dos materiais recicláveis (LÓPEZ; ROJAS, 2018).

O descarte inadequado dos plásticos tem gerado preocupações ambientais significativas devido à sua persistência no ambiente e potencial para poluição. (CORREA et al., 2003; EVODE et al., 2021) A reciclagem de plásticos é uma alternativa para reduzir os impactos ambientais associados a esses materiais. A incorporação de plásticos reciclados em novos produtos pode reduzir a demanda por matérias-primas virgens e diminuir a quantidade de resíduos plásticos nos aterros e nos ecossistemas naturais (LÓPEZ; ROJAS, 2018).

Nesse contexto, os compósitos de madeira-plástico (WPCs) representam uma inovação importante, combinando plásticos reciclados com fibras de madeira para criar materiais com propriedades mecânicas superiores e maior sustentabilidade (LÓPEZ; ROJAS, 2018). A reutilização desses materiais na produção de WPCs oferece uma solução promissora, combinando a redução de resíduos com a criação de materiais inovadores e duráveis (DE BRITO; TRINDADE, 2023).

2.2 Compósitos madeira-plástico

Os compósitos de madeira-plástico (WPCs, do inglês *Wood-Plastic Composites*) são materiais formados pela combinação de fibras de madeira e termoplásticos (CHAN et al., 2018; CORREA et al., 2003; FLORES-HERNÁNDEZ et al., 2017). Esses compósitos estão ganhando destaque na indústria devido à sua sustentabilidade, durabilidade e versatilidade (HOFFMANN et al., 2017; MORITZER; HOPP, 2017; ELSHEIKH et al., 2022).

Os WPCs surgiram na década de 1990 como uma alternativa sustentável aos materiais convencionais. Desde o início, a motivação principal foi a redução de resíduos e o desenvolvimento de materiais com melhores propriedades mecânicas e de durabilidade (JIAN et al., 2022; REDHWI et al., 2023; RIBEIRO et al., 2023; SHIH et al., 2024).

A incorporação de fibras de madeira não apenas melhora as propriedades mecânicas dos compósitos, como também pode melhorar suas propriedades térmicas e acústicas (LÓPEZ; ROJAS, 2018). Além disso, a madeira confere aos WPCs uma estética que se assemelha à da madeira natural, ampliando suas aplicações em construção civil, móveis e decoração, sem comprometer a qualidade ou a durabilidade do material compósito (KIELING et al., 2019).

A matriz plástica, geralmente composta de polipropileno (PP) ou polietileno de alta densidade (PEAD), atua como um agente de ligação que encapsula e protege as fibras de madeira, proporcionando coesão estrutural e resistência mecânica ao compósito (REDHWI et al., 2023; SHAHANI et al., 2021). A presença do plástico melhora significativamente a durabilidade do WPC, aumentando sua resistência à umidade, degradação biológica e intempéries, o que é essencial para aplicações externas (REDHWI et al., 2023). Os WPCs têm alta resistência à degradação biológica, incluindo ataques de fungos e insetos, além de serem menos propensos a

rachaduras e deformações em comparação com a madeira natural. Essas propriedades tornam os WPCs ideais para aplicações externas (KIELING et al, 2019).

Por outro lado, os WPCs também apresentam algumas limitações, como a incompatibilidade entre as fibras orgânicas e a matriz polimérica, a relevância do teor de umidade das fibras para o desempenho mecânico, estabilidade dimensional, friabilidade do material, o módulo de elasticidade pode ser menor que o da madeira (CHAHARMAHALI et al., 2010; DE BRITO; TRINDADE, 2023) e o efeito da deformação (*creep*) (FENG; XIE, 2021). A maioria das propriedades físicas e mecânicas do WPC depende da interação desenvolvida entre a madeira e o material termoplástico (CHAN et al., 2018; WECHSLER; HIZIROGLU, 2007).

A proporção de fibras de madeira para plástico influencia as propriedades dos compósitos madeira-plástico. A otimização desses parâmetros é essencial para desenvolver compósitos com propriedades específicas, como resistência à tração, flexão e impacto. A escolha adequada dos componentes e a sua proporção podem melhorar significativamente o desempenho dos WPCs em diversas aplicações (LÓPEZ; ROJAS, 2018).

Estudos recentes sobre compósitos de madeira-plástico (WPCs) que utilizam polipropileno (PP) ou polietileno de alta densidade (PEAD) como matriz têm demonstrado avanços significativos em termos de propriedades mecânicas e durabilidade ambiental. A adição de fibras de madeira a esses polímeros melhora substancialmente a resistência à tração e à flexão dos compósitos, graças à boa adesão interfacial promovida por agentes de acoplamento. A otimização do teor de fibras e o uso de aditivos específicos podem aumentar ainda mais essas propriedades, tornando os WPCs adequados para aplicações exigentes, como construção, automotiva e mobiliário externo. Além das propriedades mecânicas, os WPCs baseados em PP e PEAD demonstram alta resistência à degradação por raios UV e à absorção de umidade, características cruciais para a durabilidade em ambientes externos (REDHWI et al., 2023; SHAHANI et al., 2021).

O quadro 2.1 apresenta a comparação entre as pesquisas iniciais e as pesquisas recentes na área de compósitos de madeira-plástico.

Quadro 2.1 - Comparação entre as pesquisas iniciais e pesquisas recentes sobre WPC

	Pesquisas iniciais	Pesquisas Recentes
Compatibilidade	<ul style="list-style-type: none"> Garantir a compatibilidade entre as fibras de madeira e a matriz de plástico. A durabilidade e a resistência à umidade eram frequentemente insuficientes para aplicações exigentes (REDHWI et al., 2023). 	<ul style="list-style-type: none"> Utilização de diferentes tipos de fibras de madeira, a adição de nano e micropartículas para reforço, e o uso de resíduos plásticos reciclados como matriz (SHAHANI et al., 2021; SHIH et al., 2024). A tecnologia associada aos WPCs evoluiu significativamente, com melhorias na compatibilidade entre os componentes de madeira e plástico, além da incorporação de aditivos que melhoram as propriedades dos materiais (DE BRITO; TRINDADE, 2023).
Propriedades Mecânicas	<ul style="list-style-type: none"> Devido às limitações nas propriedades mecânicas e na durabilidade, os WPCs eram inicialmente utilizados em aplicações menos exigentes, como decks, cercas e mobiliário externo (CORREA et al., 2003). 	<ul style="list-style-type: none"> Otimização da composição e dos processos de fabricação dos WPCs para melhoria das propriedades mecânicas, térmicas e de durabilidade (LÓPEZ; ROJAS, 2018; REDHWI et al., 2023; SHAHANI et al., 2021; SHIH et al., 2024).

	Pesquisas iniciais	Pesquisas Recentes
Sustentabilidade	<ul style="list-style-type: none"> • A sustentabilidade era um ponto forte, mas os custos e os processos de fabricação ainda eram pontos críticos a serem otimizados (TAGHIYARI et al, 2023). 	<ul style="list-style-type: none"> • Destaque para o desempenho ambiental dos WPCs, enfatizando a redução de impactos ambientais e a contribuição para a economia circular através do uso de materiais reciclados. (DE BRITO; TRINDADE, 2023; SHAHANI et al., 2021).

Uma das principais áreas de aplicação dos WPCs é na construção civil. Esses materiais são utilizados como alternativa em substituição à madeira natural devido à sua resistência à umidade, durabilidade e menor necessidade de manutenção (Figura 2.1). Os WPCs também são utilizados em cercas, guarda-corpos, revestimentos de fachadas e mobiliário urbano, aproveitando suas propriedades de resistência às intempéries e ao ataque de insetos (SANTOS et al., 2021).

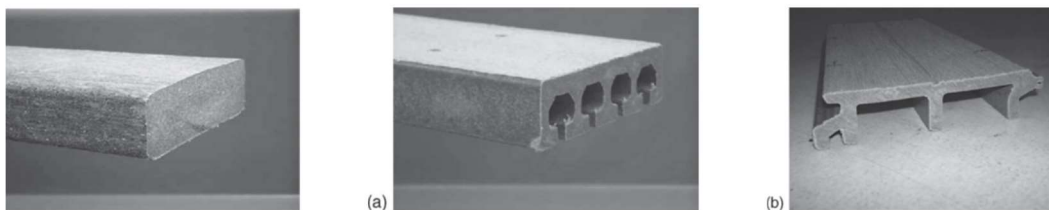


Figura 2.1 - Perfis fabricados com WPC – fonte:(KLYOSOV, 2007)

Os compósitos de madeira-plástico também são utilizados em aplicações de infraestrutura e engenharia civil, como pontes, passarelas e estruturas de suporte. A resistência à corrosão e a capacidade de suportar cargas pesadas fazem dos WPCs uma alternativa viável aos materiais tradicionais (CORREA et al., 2003).

Os WPCs são ideais para móveis de exterior, como bancos de praça e mesas de jardim, devido à sua resistência à degradação. Além disso, eles são utilizados em móveis de interiores, onde sua estabilidade dimensional e variedade de acabamentos oferecem uma estética atraente e moderna. (KIELING et al, 2019). No design de

interiores, os compósitos de madeira-plástico são empregados em painéis decorativos, rodapés e acabamentos diversos. A versatilidade desses materiais permite que sejam moldados em diferentes formas e texturas, oferecendo uma ampla gama de opções para designers e arquitetos (DE BRITO; TRINDADE, 2023).

Os WPCs na indústria automotiva são utilizados em componentes internos de veículos, como painéis de portas, consoles centrais e painéis de instrumentos. A leveza e a resistência dos WPCs contribuem para a redução do peso total do veículo, melhorando a eficiência de combustível e reduzindo as emissões de CO₂ (LÓPEZ; ROJAS, 2018).

Estes compósitos ainda podem ser utilizados em uma variedade de produtos de consumo, incluindo utensílios de cozinha, brinquedos e artigos esportivos. A durabilidade e a segurança dos WPCs os tornam uma escolha popular para produtos que exigem resistência ao desgaste e ao uso intenso (MISUCOCHI et al., 2022).

A produção de WPCs começa com a seleção e preparação das fibras de madeira, que podem ser de diferentes tipos e tamanhos dependendo da aplicação final do compósito. Essas fibras são combinadas com polímeros termoplásticos, como polietileno ou polipropileno, através de processos de mistura mecânica ou extrusão. Durante o processo de fabricação, podem ser adicionados aditivos para melhorar a adesão entre as fibras e a matriz plástica, além de ajustar as propriedades finais do material (GARDNER; HAN; WANG, 2015; KIELING et al, 2019). A escolha dos materiais e dos parâmetros de processamento é importante para a determinação das propriedades do compósito final, incluindo resistência mecânica, estabilidade dimensional e resistência à degradação (BHASKAR et al., 2020; CHOWDHURY et al., 2022; CORREA et al., 2003; ELSHEIKH et al., 2022).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Preparo do Material

Os resíduos de MDF (*Medium Density Fiberboard*) foram coletados em uma empresa de produção de móveis sob medida localizada no Guará – DF. O material foi retirado de um coletor de pó com resíduos do corte de uma serra seccionadora.

Já os resíduos de madeira foram coletados em uma madeireira especializada em esquadrias de alto padrão e grandes formatos localizada no Guará – DF, que utiliza as seguintes espécies de madeira: Cumaru, Sucupira, Freijó e Ipê. O resíduo foi recolhido de uma serra circular de bancada, onde são cortadas várias madeiras e não há uma separação do resíduo por tipo de espécie.

Foi realizada uma medição da densidade a granel dos resíduos, utilizando uma caixa com as dimensões 4,7 cm x 3,2 cm x 1,3 cm. Os resíduos de madeira apresentaram densidade de 0,421 g/cm³ e o MDF 0,307 g/cm³.

Para a fabricação dos WPCs os resíduos (Figura 3.1) foram peneirados com granulometria de 40/60 *mesh*. O teor de umidade médio dos resíduos foi de 5%.



Resíduo madeira



Resíduo MDF

Figura 3.1 - Resíduos de madeira e MDF utilizados nos compósitos

As matrizes poliméricas (Figura 3.2) foram compostas por polipropileno (PP) e polietileno de alta densidade (PEAD) virgens. O PP (temperatura de fusão ~160 °C) foi adquirido no mercado local. Já o PEAD (temperatura de fusão ~120 °C) foi uma doação do Laboratório de Produtos Florestais da UFSM.

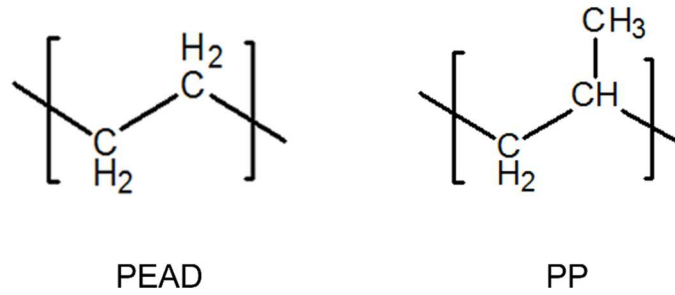


Figura 3.2 - Composição química do PEAD e PP – fonte (CRQ, 2024)

3.2 Fabricação dos Compósitos

Foram produzidos compósitos com diferentes razões de massa de plástico e madeira. As composições utilizadas para a fabricação dos compósitos são apresentadas na Tabela 3.1. A fim de possibilitar a comparação entre as propriedades dos compósitos e do plástico, foram produzidas amostras sem adição dos resíduos de madeira.

Tabela 3.1 - Formulação dos compósitos madeira-plástico

Matriz	Compósito	Resíduo (%)	Plástico (%)
PP	PP-100	0	100
	WPP-15	15	85
	WPP-30	30	70
	MDFPP-15	15	85
	MDFPP-30	30	70
	PEAD	PEAD-100	0
WPEAD-15		15	85
WPEAD-30		30	70
MDFPEAD-15		15	85
MDFPEAD-30		30	70

A produção dos compósitos se deu em três etapas conforme a Figura 3.3.



Figura 3.3 - Etapas de produção dos compósitos

Na primeira etapa, foram produzidos pellets dos plásticos com comprimento de 0,5 mm e então misturados com os finos da madeira / MDF. Na segunda etapa, a mistura plástico-madeira foi extrudada utilizando uma extrusora dupla rosca co-rotante (Thermo Scientific™ Process 11 Parallel Twin-Screw Extruder). Os parâmetros utilizados na extrusão dos compósitos, utilizando PP e PEAD como matriz polimérica, estão descritos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Parâmetros para extrusão dos compósitos onde Z = zona de aquecimento e Vr = velocidade das roscas

Compósito	Z1 (°C)	Z2 (°C)	Z3 (°C)	Z4 (°C)	Z5 (°C)	Z6 (°C)	Z7 (°C)	Z8 (°C)	Vr (rpm)
PP-100	145	155	165	175	185	195	195	195	110
PEAD-100	130	145	155	160	165	170	175	180	110
WPP-15	195	195	195	195	195	200	200	200	50
WPP-30	200	200	200	200	200	210	210	210	40
WPEAD-15	185	190	190	190	190	195	195	195	15
WPEAD-30	185	190	190	190	190	195	195	195	30
MDFPP-15	175	185	195	205	215	225	225	225	40
MDFPP-30	180	195	200	205	215	225	225	225	40
MDFPEAD-15	140	155	165	170	175	180	185	190	20
MDFPEAD-30	150	165	175	180	185	190	195	200	20

A terceira e última etapa consistiu na fabricação dos corpos de prova (Figura 3.4) utilizando uma injetora de sistema de moldagem por pistão de injeção (HAAKE™ MiniJet Pro).



Figura 3.4 - Exemplos de corpos de prova: a) corpo de prova para os ensaios de absorção de água, perfil de densidade, DMA e dureza; b) corpo de prova para o ensaio de tração

Os parâmetros utilizados na injeção dos corpos de prova são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Parâmetros de injeção dos compósitos onde Pi = pressão de injeção; ti = tempo de injeção; Pr = pressão de recalque; tr = tempo de recalque; Tm = temperatura do molde e Tc = temperatura do cilindro

Compósito	Pi (bar)	ti (s)	Pr (bar)	tr (s)	Tm (°C)	Tc (°C)
PP-100	600	8	550	18	50	200
PEAD-100	400	8	350	18	50	160

Compósito	Pi (bar)	ti (s)	Pr (bar)	tr (s)	Tm (°C)	Tc (°C)
WPP-15	350	6	300	20	60	240
WPP-30	350	6	300	20	60	250
WPEAD-15	350	6	300	15	50	190
WPEAD-30	350	6	300	15	50	200
MDFPP-15	400	6	350	20	60	240
MDFPP-30	450	6	400	20	70	250
MDFPEAD-15	350	6	300	15	80	200
MDFPEAD-30	350	6	300	20	85	210
*PP-100	550	5	500	15	50	200
*PEAD-100	550	5	500	18	50	160
*WPP-15	450	6	400	20	95	240
*WPP-30	450	6	400	20	95	250
*WPEAD-15	400	6	350	20	90	190
*WPEAD-30	450	6	400	20	95	210
*MDFPP-15	450	6	400	20	95	240
*MDFPP-30	450	6	400	20	95	250
*MDFPEAD-15	400	6	350	20	90	200
*MDFPEAD-30	400	6	350	20	90	210

* corpo de prova para ensaio de tração

3.3 Propriedades Físicas

A taxa de absorção de água (AA) dos compósitos foi determinada com medições após 2 e 24 h de imersão em água em temperatura ambiente. Para cada formulação dos compósitos foram utilizadas três amostras com dimensões médias de 42,0 mm x 12,0 mm x 3,3 mm (comprimento, largura e espessura).

As amostras tiveram sua massa aferida em diferentes momentos e a AA foi determinada com a equação:

$$AA (\%) = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100$$

Onde M_1 é a massa das amostras (g) em determinado tempo (t) e M_0 é a massa inicial da amostra (g).

Os perfis de densidade das amostras foram determinados usando o aparelho de varredura de densidade DAX6000 da GreCon Co Ltd., que usa raios-x como fonte. Foram medidos os perfis das amostras de cada formulação dos compósitos. (Figura 3.5).



Figura 3.5 - Equipamento para medição do perfil de densidade

3.4 Análise Mecânica Dinâmica – DMA

As análises mecânicas dinâmicas foram realizadas utilizando um *Dynamic Mechanical Analyzer* (DMA-342E NETZSCH Co Ltd) (Figura 3.6). O DMA gera cargas de deformação ou tensão senoidal, gerando três parâmetros característicos dos materiais testados: módulo de armazenamento E' , módulo de perda E'' e fator de perda $\tan d$ ($\tan d = E''/E'$).



Figura 3.6 - Equipamento para o ensaio DMA

Para a análise foi utilizada uma amostra por compósito com dimensões de 50 mm x 12 mm x 3 mm (comprimento, largura e espessura) utilizando o modo flexão estática (*3-point bending*; $L = 40$ mm) (Figura 3.7). Os ensaios foram realizados com temperatura variando entre 30 °C e 230 °C com taxa de aquecimento de 2 K/min. Foram produzidas cargas em frequências de 1 Hz.

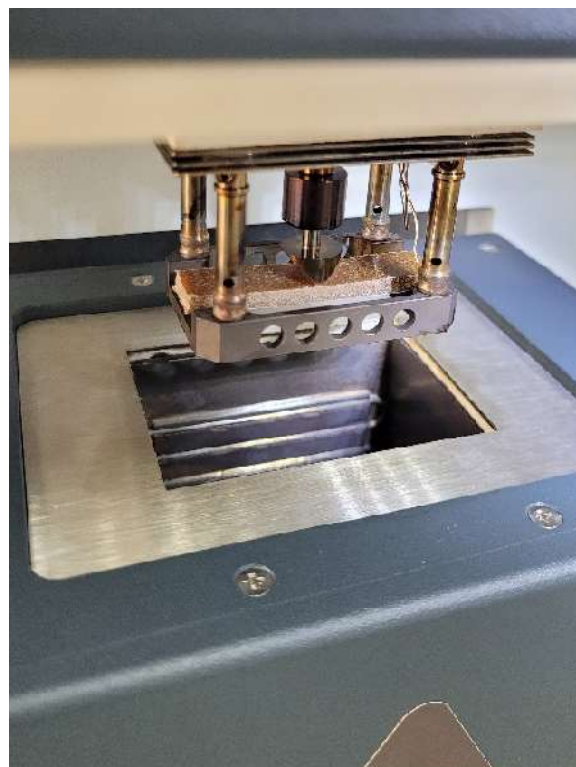


Figura 3.7 - Corpo de prova no ensaio DMA utilizando o modo *3-point bending*

3.5 Propriedades Mecânicas

3.5.1 Ensaio de Dureza

Foi realizado o ensaio de micro dureza Vickers (Figura 3.8), no equipamento Duran Scan EMCO TEST, no modo Vickers e lupa com aumento de 10x, conforme norma ASTM E384 com carga de 0,1 kgf, para obtenção da dureza dos compósitos. Foram medidos cinco pontos em cada uma das amostras. Foram utilizadas duas amostras de cada composição.

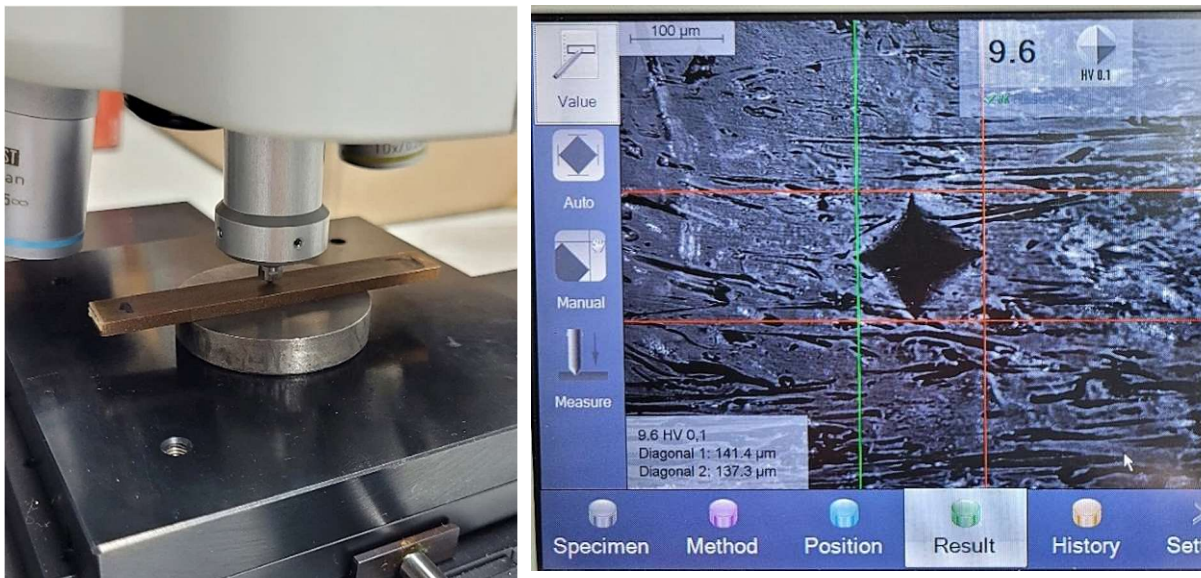


Figura 3.8 - Ensaio de micro dureza Vickers com carga de 0,1 Kgf

3.5.2 Ensaio de Tração

As propriedades mecânicas dos compósitos, como módulo de elasticidade, resistência à tração, percentual de deformação e comportamento da curva tensão-deformação, foram obtidas através do ensaio de tração realizado no equipamento de sistema servo-hidráulico MTS 810 Landmark, com célula de carga de 5 KN (Figura 3.9), distância entre as garras de 50 mm, taxa de deslocamento de 40 mm/min e pressão das garras de 0,5 MPa.



Figura 3.9 - Equipamento de ensaio de tração com célula de carga de 5 KN

Foi realizado o teste em cinco amostras de cada compósito com base na norma ASTM D638. As condições de temperatura e umidade seguiram os requisitos estabelecidos na norma ASTM D618.

A resistência à tração foi calculada conforme equação:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_0}$$

Onde σ_t é resistência à tração (MPa), F a carga aplicada em (N) e A_0 a área da seção transversal do corpo de prova (mm^2).

O módulo de elasticidade foi determinado pela equação:

$$E_t = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Onde E_t é o módulo de elasticidade (MPa), σ é tensão (MPa) e ε é a deformação (%).

Como o corpo de prova não atendeu a geometria estabelecida na norma foram

realizados ensaios para a determinação dos parâmetros e taxa de deslocamento do ensaio.

3.6 Análise estatística

Para comparação dos dados dos compósitos, de acordo com cada matriz polimérica, os resultados de absorção de água (AA), módulo de elasticidade (E_t) e resistência à tração (σ_t), foram analisados através de análise de variância (ANOVA), utilizando o software R. O teste de médias empregado foi teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fabricação dos compósitos

Na fabricação dos *pellets* pelo processo de extrusão, foram realizados vários testes até chegar nas temperaturas que permitissem o compósito fundir e fluir pela matriz. Constatou-se que, quanto maior a quantidade de resíduo de marcenaria colocado no compósito, maiores deveriam ser as temperaturas programadas.

O mesmo aconteceu no processo de injeção dos corpos de prova. Quanto maior a quantidade de resíduo, maior foi a temperatura programada no cilindro e, em alguns casos, a pressão de injeção também acabou sendo maior.

Em termos práticos, principalmente no processo de injeção, os compósitos que melhor fluíram e tiveram maior facilidade de trabalho foram aqueles com matriz em PP.

4.2 Absorção de água

É possível observar que os compósitos produzidos absorveram pouca água (Figura 4.1). A ANOVA demonstrou que não houve diferença estatística a 5 % de probabilidade.

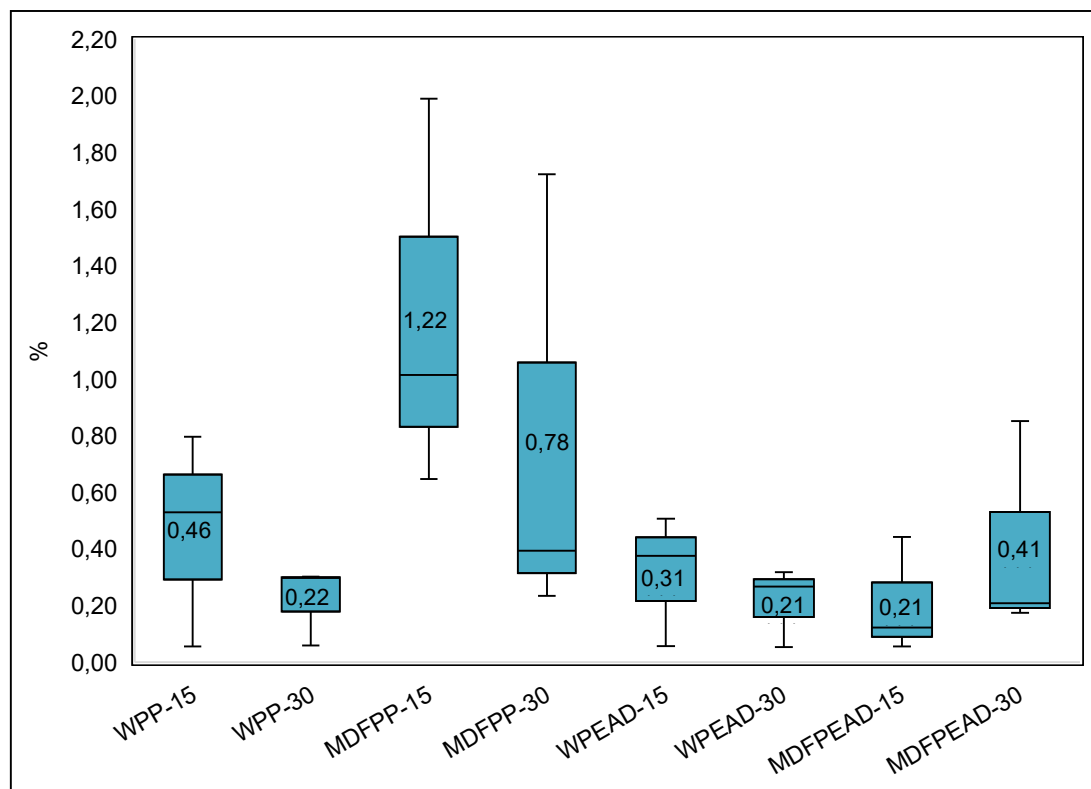


Figura 4.1 - Absorção de água dos compósitos após 24h (%)

O polipropileno e polietileno de alta densidade são materiais que absorvem pouca umidade em função de suas características hidrofóbicas (SHAHANI et al., 2021). Compósitos com essas matrizes podem absorver menos água em função de sua polaridade comparados com outras resinas. WPCs com alta quantidade de resíduo madeireiro podem apresentar baixa absorção de água em função de sua encapsulação e melhor distribuição na matriz (GUO et al, 2019).

Os corpos de prova utilizados no ensaio foram fabricados a partir do processo de injeção e, à medida que o material fundido entra em contato com as paredes do molde, refrigera e vai formando uma camada plástica que reduz ainda mais a absorção de água (BURGSTALLER; RENNER, 2024).

4.3 Perfil de densidade longitudinal

Conforme os resultados da densidade média dos compósitos (Tabela 4.1), é possível observar que ela aumentou de acordo com o aumento do teor de resíduos de marcenaria. Para os compósitos com matriz em PP, o maior aumento de densidade ocorreu com o resíduo de MDF. Houve um aumento de 86,0 % na densidade do MDFPP-15 e 95,7 % do MDFPP-30 em comparação ao PP-100. Já para os compósitos com matriz em PEAD é possível observar um aumento na densidade com a concentração de 30 % de resíduo. No caso do WPEAD-30 o aumento foi de 16,3% e do MDFPEAD-30 foi de 10,1 % em comparação ao PEAD-100.

Tabela 4.1 - Densidade média dos compósitos

Compósito	Densidade média (kg/m³)
PP-100	829
WPP-15	858
WPP-30	954
MDFPP-15	1542
MDFPP-30	1622
PEAD-100	872
WPEAD-15	914
WPEAD-30	1014
MDFPEAD-15	880
MDFPEAD-30	960

Quanto maior o teor de resíduos de marcenaria no compósito maior será sua densidade (CANTO-BORGES et al., 2024; JIAN et al., 2022) e a densidade do material está intimamente relacionada às propriedades mecânicas dos compósitos, contribuindo para a melhoria do seu desempenho mecânico. Com o aumento da

densidade, em função da adição de resíduos de marcenaria, observa-se um aumento no módulo de elasticidade dos compósitos (KALE; CHAUHAN, 2017). O estudo de Kale e Chauhan (2017) verificou que o módulo de elasticidade aumentou em torno de duas vezes com o aumento da densidade dos compósitos.

Em relação a homogeneização dos compósitos, é possível observar, no exemplo da Figura 4.2, que não houve variações expressivas na densidade ao longo do comprimento deles, indicando uma boa mistura entre o resíduo e a matriz polimérica. Os demais perfis de densidade podem ser analisados no Apêndice A.

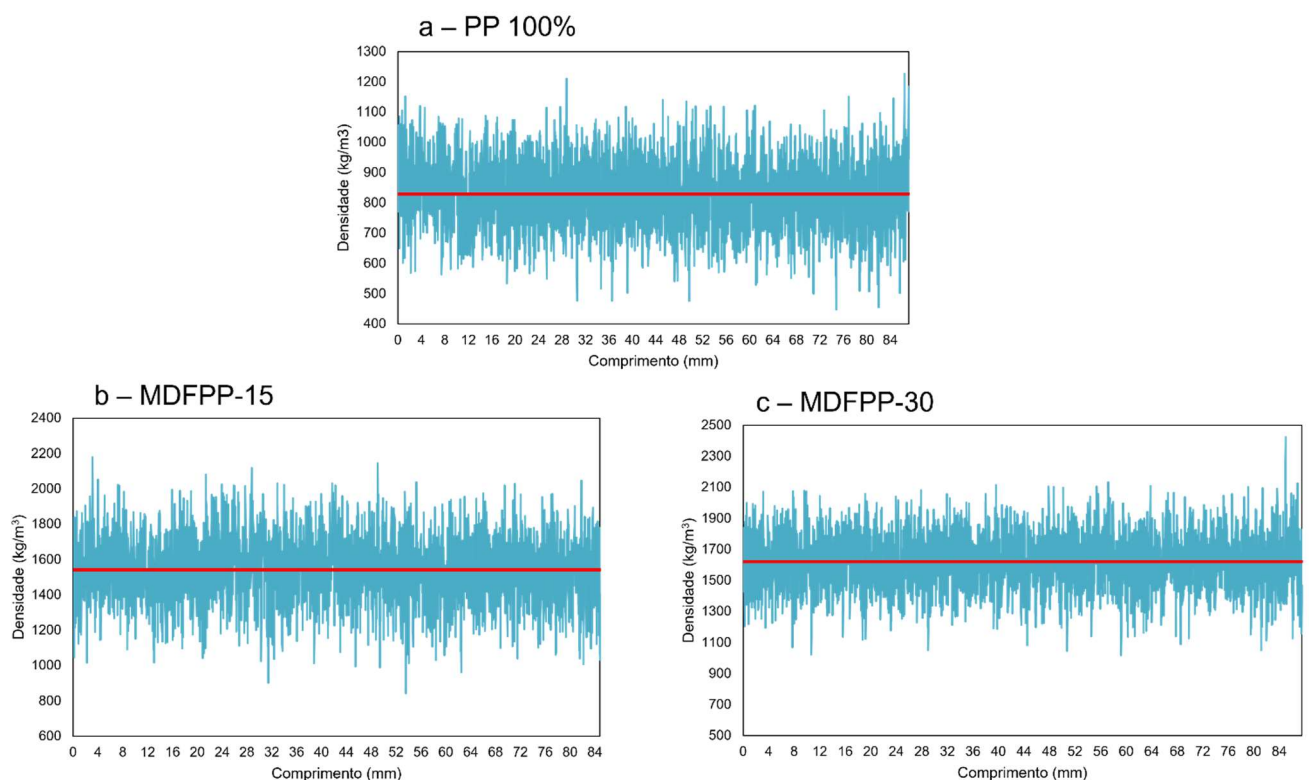


Figura 4.2 – Perfis de densidade de compósitos com matriz em PP e resíduo de MDF. a) PP 100%, b) MDFPP-15 e c) MDFPP-30

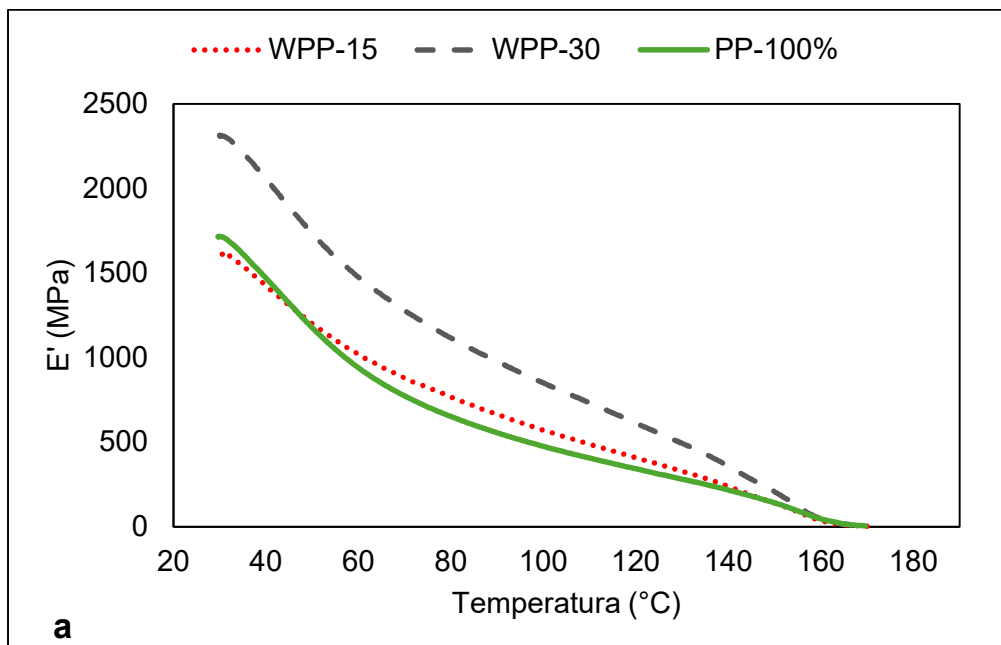
4.4 Análise Mecânica Dinâmica

O módulo de conservação (E') é uma medida do quão elástico o material é, indicando a capacidade do material em suportar o carregamento aplicado, ou seja, quanto maior o E' mais rígido será o material. O módulo de perda ou módulo viscoso (E'') expressa a energia perdida devido ao atrito interno. O fator de perda ($\tan \delta$) é dado pela razão entre perda e o módulo de conservação, sendo um indicador da eficiência com que o material perde energia devido aos rearranjos moleculares e

atritos internos, ou seja, ele quantifica a dissipação de energia interna no material (FLORES-HERNÁNDEZ et al., 2017).

A Figura 4.3 apresenta os resultados dos compósitos fabricados com resíduos de madeira. É possível observar que a resistência dos compósitos é afetada pela variação de temperatura. O compósito WPP-15 a uma temperatura de 30 °C apresenta valor de E' de 1610 MPa e o WPP-30 apresenta módulo de conservação de 2309 MPa. Já para os compósitos com matriz em PEAD, a 30 °C observa-se valores de E' de 1875 MPa para o WPEAD-15 e 2004 MPa para WPEAD-30.

Compósitos com baixo teor de madeira podem apresentar valores de E' próximo ao material virgem em função da dominância das características da matriz plástica (HAQ, 2021).



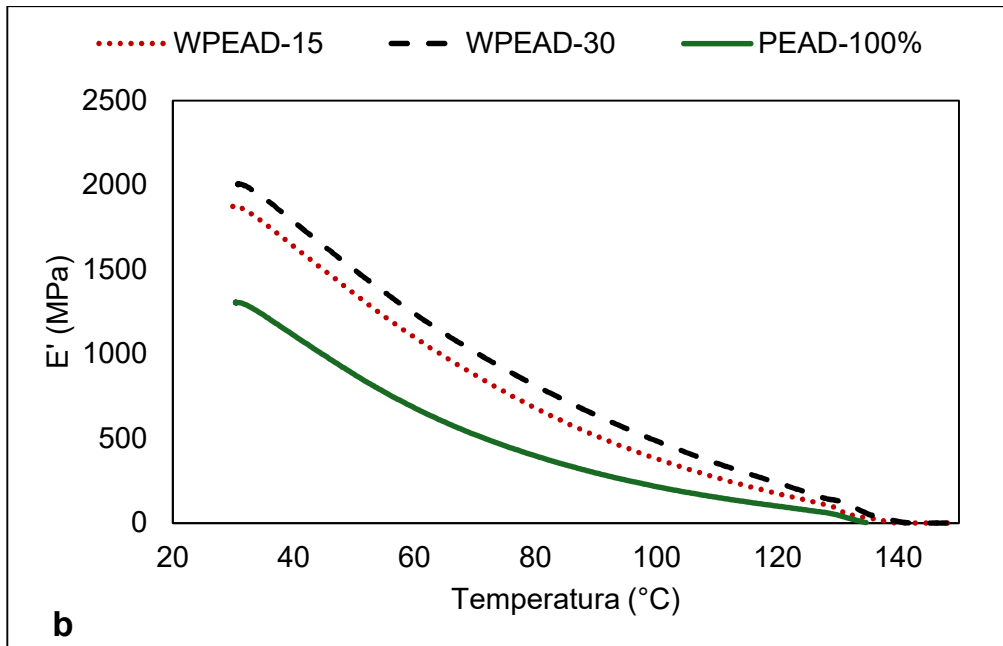


Figura 4.3 - Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de madeira: a) matriz em PP e b) matriz em PEAD

Os compósitos fabricados com resíduos em MDF apresentam um comportamento semelhante aos com resíduos de madeira. A Figura 4.4 aponta que, a uma temperatura de 30 °C, o compósito MDFPP-15 apresenta valor de E' de 2129 MPa e o MDFPP-30 apresenta módulo de conservação de 2205 MPa. Já para os compósitos com matriz em PEAD, à mesma temperatura, observa-se valores de E' de 1754 MPa para o MDFPEAD-15 e 2620 MPa para MDFPEAD-30.

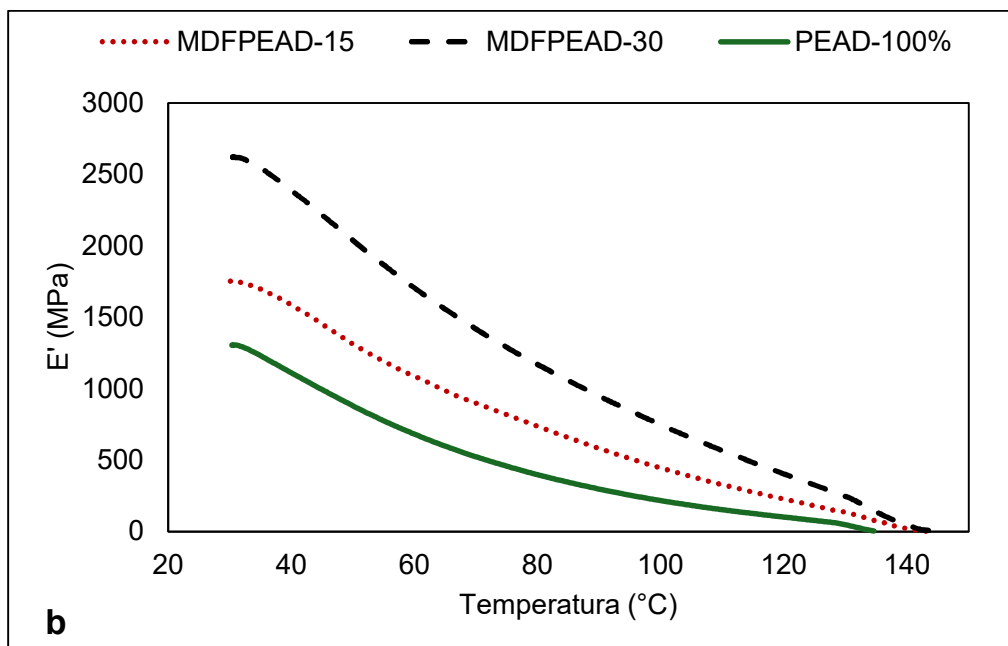
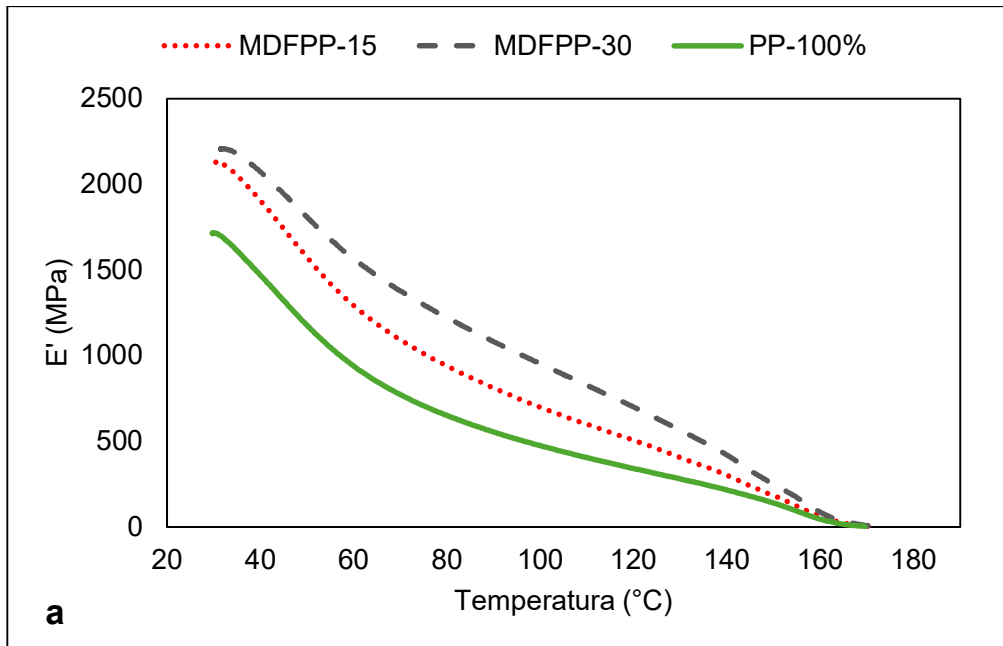


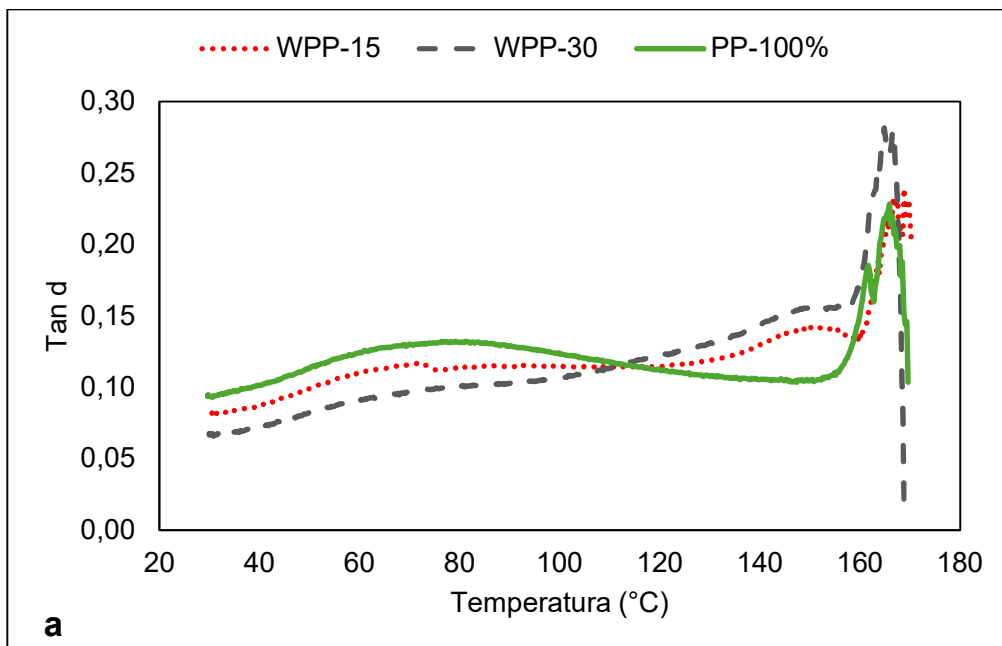
Figura 4.4 - Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de MDF: a) matriz em PP e b) matriz em PEAD

Quanto maior a quantidade de resíduos de marcenaria no compósito, mais rígido ele tende a ser. Isso acontece porque as fibras da madeira são naturalmente mais rígidas que a matriz plástica. Quando essas fibras são bem distribuídas e misturadas de maneira uniforme com o plástico, elas ajudam a melhorar as propriedades mecânicas do WPC (EFFAH et al, 2018; MURAYAMA et al., 2019).

A redução do módulo de conservação com o aumento da temperatura se dá

em função do aumento da mobilidade das cadeias do PP e PEAD geradas pelo calor, ou seja, essa mobilidade permite que as cadeias deslizem mais facilmente umas sobre as outras resultando em uma diminuição na resistência à deformação (NÚÑEZ-DECAP et al, 2021; SHAIKH et al., 2023).

A Figura 4.5 apresenta as curvas de tan d dos compósitos feitos com resíduos de madeira. Os valores mais altos de tan d encontrados foram 0,24 para o compósito WPP-15 (em 167,5 °C) e 0,28 para o WPP-30 (em 166,5 °C). Para os compósitos com matriz em PEAD, os valores mais altos da tan d foram 0,35 para o compósito WPEAD-15 (em 135 °C) e 0,46 para o WPEAD-30 (em 138 °C).



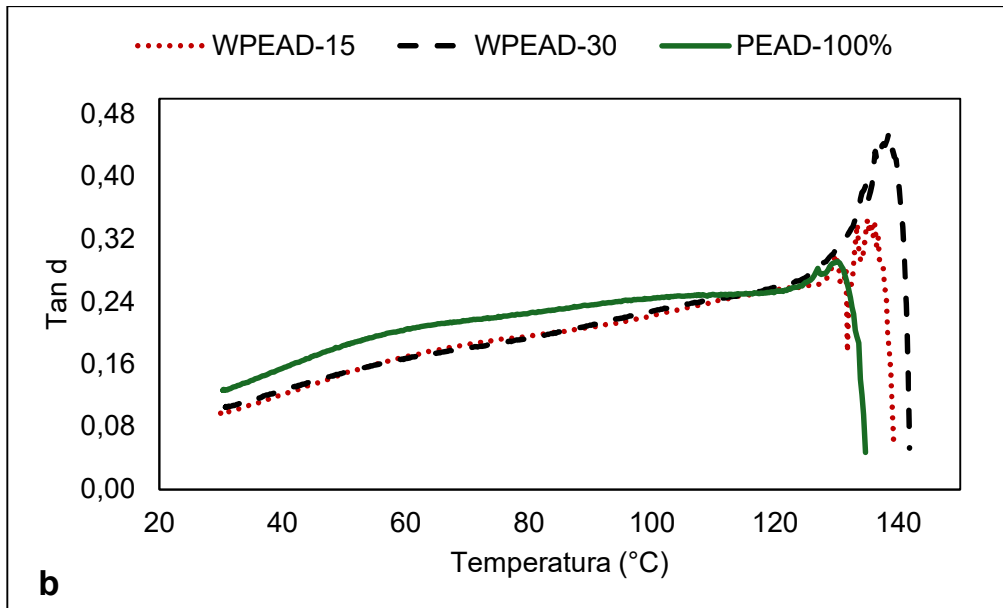
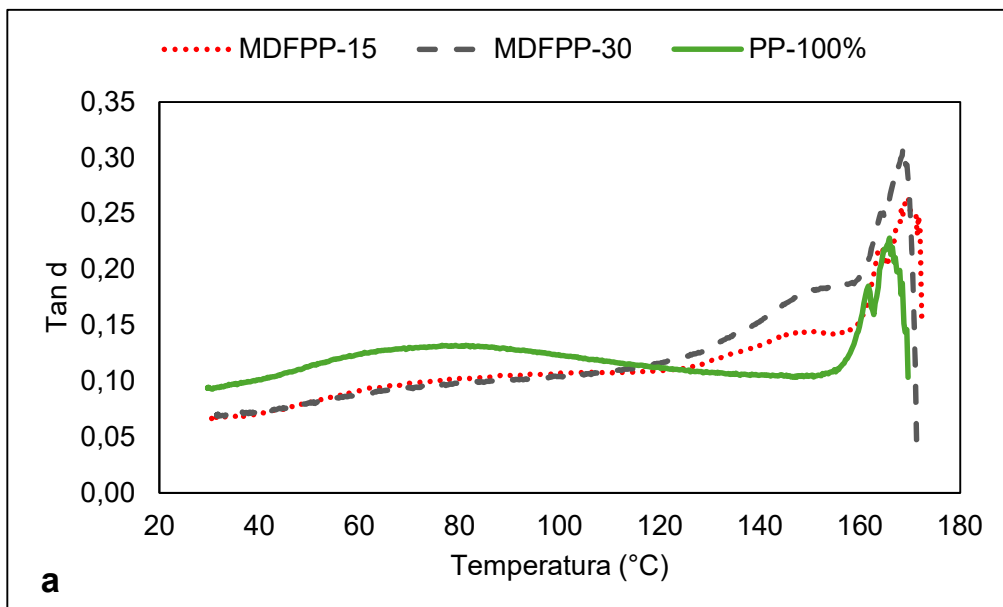


Figura 4.5 - Curvas tan d dos compósitos com resíduo em madeira: a) matriz em PP e b) matriz em PEAD

A Figura 4.6 ilustra as curvas de tan d dos compósitos contendo resíduos de MDF. Observou-se que os maiores valores de tan d foram registrados em 0,26 para o compósito MDFPP-15 (a 168 °C) e 0,31 para o MDFPP-30 (a 169 °C). Nos compósitos com matriz de PEAD, os valores mais elevados de tan d foram 0,35 para o MDFPEAD-15 (a 136 °C) e 0,46 para o MDFPEAD-30 (a 140 °C).



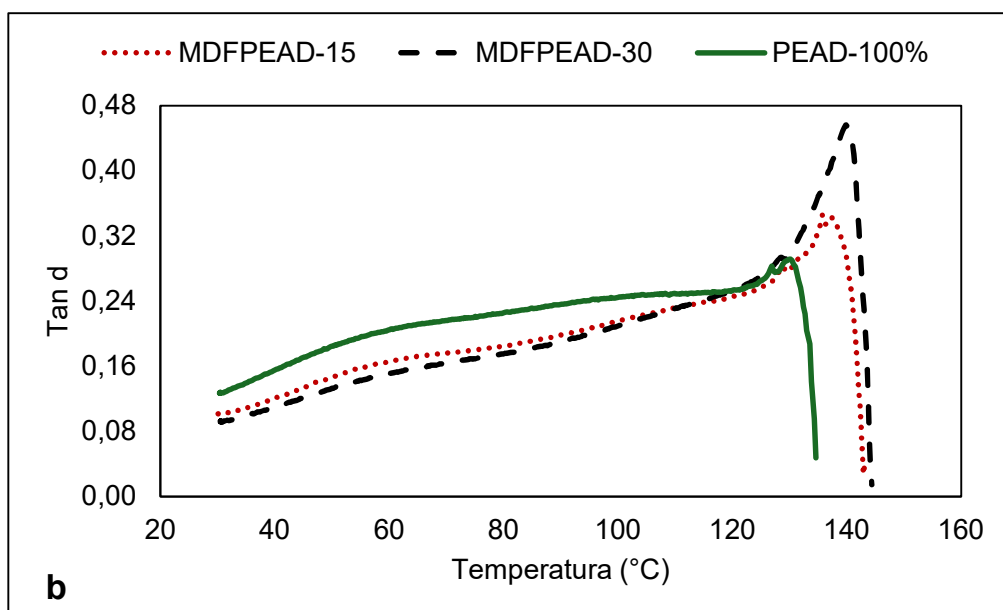


Figura 4.6 - Curvas tan d dos compósitos com resíduo em MDF: a) matriz em PP e b) matriz em PEAD

A adição dos resíduos implicou em um aumento da tan d. O aumento de tan d pode estar relacionado com o atrito entre as partículas de madeira aglomeradas dentro do compósito e/ou pelo atrito entre a madeira e a matriz polimérica, especialmente quando não há boa adesão entre eles. Em termos simples, materiais com menor tan d têm um comportamento mais elástico, ou seja, eles são menos viscosos e dissipam menos energia durante a deformação (AMBRÓSIO et al., 2019).

4.5 Propriedades Mecânicas

Os resultados das propriedades mecânicas dos compósitos estudados são apresentados na Tabela 4.2. Já o comportamento dos compósitos pode ser analisado pelas curvas de resistência à tração (σ_t) x deformação (ϵ) no Apêndice B.

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas dos compósitos submetidos ao ensaio de tração

Compósito*	E_t (MPa) ¹	σ_t (MPa) ¹	Deformação (%)	Dureza (HV) ²
PP-100	2044,20 b (67,2)	46,14 a (1,19)	16,61	8,3
WPP-15	1882,88 b (157,52)	36,93 bc (1,08)	8,23	8,7
WPP-30	2077,70 b (64,04)	35,04 c (1,32)	4,89	8,5
MDFPP-15	2025,14 b (133,88)	39,39 b (1,90)	11,82	8,8
MDFPP-30	2338,42 a (52,77)	36,93 bc (0,79)	5,55	9,7

Compósito*	E_t (MPa) ¹	σ_t (MPa) ¹	Deformação (%)	Dureza (HV) ²
PEAD-100	968,85 A (281,23)	36,18 A (1,12)	32,24	4,1
WPEAD-15	1021,17 A (179,17)	34,50 A (1,18)	7,67	4,3
WPEAD-30	1192,54 A (294,14)	30,90 B (1,97)	4,89	4,6
MDFPEAD-15	953,14 A (469,90)	30,56 B (2,26)	8,15	4,7
MDFPEAD-30	1431,64 A (124,78)	30,84 B (1,42)	4,49	5,5

*A análise estatística empregada foi realizada para cada matriz polimérica. 1 - Valores acompanhados de letras iguais não apresentaram diferença significativa, no teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas foram utilizadas para WPCs com matriz em PP e letras maiúsculas para matriz em PEAD. Valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão. 2 – Não foi realizado teste estatístico pois não houve repetições suficientes ($n < 3$)

Após realizado teste de ANOVA e Tukey, observou-se que para os compósitos com matriz em PP há uma diferença no módulo de elasticidade do MDFPP30 em relação aos outros compósitos. Já na resistência à tração, o WPP15 e o MDFPP30 podem ser considerados iguais. Para os compósitos com matriz em PEAD não há nenhuma diferença no módulo de elasticidade, já na resistência à tração o WPEAD15 se difere dos demais compósitos.

No quadro 4.1 é possível observar a tendência do comportamento mecânico dos compósitos ao se adicionar o resíduo de marcenaria em relação aos polímeros virgens.

Quadro 4.1 - Tendência dos resultados das propriedades mecânicas ao se adicionar resíduos de marcenaria no compósito

Compósito*	E_t (MPa)	σ_t (MPa)	Dureza (HV)
PP-100	-	-	-
WPP-15	↔	↓↓	↑
WPP-30	↔	↓↓↓	↔
MDFPP-15	↔	↓	↑
MDFPP-30	↑	↓↓	↑↑
PEAD-100	-	-	-
WPEAD-15	↔	↔	↔
WPEAD-30	↔	↓	↑
MDFPEAD-15	↔	↓	↑
MDFPEAD-30	↔	↓	↑↑

* Legenda: valores que mantiveram comportamento semelhante ao material virgem estão com o símbolo ↔. Valores maiores estão com símbolo ↑ e menores com símbolo ↓

Os resultados mostraram que, para os compósitos de matriz em PP, a adição de 15 % de madeira prejudicou significativamente a resistência à tração (36,93 MPa), embora tenha melhorado a dureza (8,8 HV), com módulo de elasticidade (E_t) próximo ao PP puro. Com 30% de madeira, o E_t aumentou (2077,70 MPa), mas a resistência à tração caiu para 35,04 MPa. Nos compósitos com MDF, a adição de 15% apresentou um E_t de 2025,14 MPa e maior resistência à tração (39,39 MPa). Com 30% de MDF, o módulo de elasticidade aumentou significativamente (2338,42 MPa), enquanto a resistência à tração manteve-se estável.

Para os compósitos de PEAD, a adição de 15 % de madeira eleva levemente o E_t (1021,17 MPa) e prejudica a resistência à tração (34,50 MPa). Com 30%, o módulo de elasticidade foi maior (1192,54 MPa), mas a resistência à tração diminuiu (30,90 MPa). Nos compósitos com MDF, o E_t aumentou com a maior quantidade de MDF, alcançando 1431,64 MPa com 30 %, enquanto a resistência à tração variou um pouco. A dureza dos compósitos de PEAD variou entre 4,1 e 5,4 HV.

A adição de resíduos de marcenaria aos compósitos pode gerar efeitos variados nas propriedades mecânicas, dependendo da formulação e do tratamento específicos dos materiais. Em alguns casos, a incorporação de farinha de madeira pode resultar em um aumento do módulo de elasticidade, mas pode haver uma redução na resistência à tração, quando comparado ao material virgem (CHENG et al., 2010; REDHWI et al., 2023).

O aumento do módulo de elasticidade em compósitos madeira-plástico com maior teor de resíduos pode estar relacionado a vários fatores, incluindo as propriedades estruturais das fibras da madeira e sua interação com a matriz polimérica. (REDHWI et al., 2023). A adição do resíduo pode ajudar na redução de vazios na estrutura do compósito, resultando em um material mais denso (ÖZMEN et al., 2014), aumentando a rigidez geral do compósito, levando a um maior E_t (CHENG et al., 2010; ÖZMEN et al., 2014; REDHWI et al., 2023). No artigo de Redhwi et al (2023), o módulo de elasticidade dos compósitos com matriz em PEAD aumentou de 619 MPa (PEAD controle) para 1462 MPa (PEAD com 36 % de madeira). Já para os compósitos com matriz em PP aumentou de 992 MPa (PP controle) para 1712 MPa (PP com 36 % de madeira).

O aumento de material lignocelulósico nos compósitos geralmente aumenta a dureza (NUKALA et al., 2022), porém os com matriz em PEAD possuem valores mais

baixos em relação aos de PP em função das características do polímero (REDHWI et al., 2023). No estudo de Nukala et al (2022), é possível observar que a dureza aumentou de 1,5 HV (PP) para 7,8 HV no compósito com 30% de serragem e 9,8 HV para o que utilizou 40% de serragem.

De acordo com os resultados, observou-se que tanto os resíduos de madeira quanto MDF interagiram bem com as matrizes poliméricas. Em relação aos compósitos com matriz em PP, o resíduo de MDF apresentou melhores propriedades mecânicas, já para o PEAD, tanto o resíduo de madeira quanto MDF apresentaram resultados semelhantes.

Os compósitos que utilizaram o MDF podem ter apresentado melhores propriedades em função das características do material. O adesivo presente no MDF pode influenciar nas propriedades do compósito, durante o processamento alguns componentes do adesivo podem migrar para a matriz aumentando a adesão dos componentes, proporcionando uma melhoria nas propriedades mecânicas do material. (ÖZMEN et al., 2014). De forma geral, a compatibilidade entre o MDF e polímeros hidrofóbicos é baixa (GUO et al., 2021), mas pode ser melhorada quando o MDF é tratado termicamente, pois suas tensões internas passam para um estado mais flexível fazendo com que haja um rearranjo das partículas (DEL MENEZZI et al., 2009), o que pode ter ocorrido já que o MDF foi aquecido durante o processo de extrusão do compósito. Esse aquecimento pode ter proporcionado melhor ligação da interface entre o polímero e MDF.(GUO et al., 2021).

O MDFPP-30 se destacou com um bom desempenho mecânico. Ele combinou uma boa resistência mecânica com uma dureza significativa, o que o torna ideal para aplicações que exigem materiais capazes de suportar grandes esforços e resistência ao desgaste, sendo possível sua aplicação na construção civil.

5. CONCLUSÕES

A presente dissertação avaliou os efeitos da adição de resíduos de marcenaria nas propriedades físicas e mecânicas de compostos com matriz polimérica de polipropileno (PP) e polietileno de alta densidade (PEAD). Os resultados revelaram que os resíduos de madeira e MDF podem ser utilizados com sucesso na formulação de compósitos, contribuindo para o desenvolvimento de materiais sustentáveis e de alto desempenho.

As análises revelaram que os compósitos com maior teor de resíduos apresentaram maiores densidades e a absorção de água foi baixa. Tanto os resíduos de madeira quanto MDF tiveram boa interação com as matrizes de PP e PEAD. Do ponto de vista mecânico, os compósitos com resíduos de MDF tiveram um desempenho superior, principalmente na proporção de 30 %. O MDFPP-30 se destacou em relação aos outros pelos seus resultados mecânicos superiores.

Portanto, a utilização de resíduos de marcenaria em compósitos de madeira-plástico oferece uma alternativa viável e sustentável para o aproveitamento de resíduos industriais, além de apresentar propriedades físicas e mecânicas adequadas para diversas aplicações.

REFERÊNCIAS

- AMBRÓSIO, J. D. et al. Characterization of flexible Poly (vinyl butyral) / wood flour composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 175, 15 out. 2019.
- ASTM D618. Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing, USA, 2021
- ASTM D638. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, USA, 2022
- ASTM E384. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, USA 2022
- BASALP, D. 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, 1 out. 2020.
- BHASKAR, K. et al. Analysis on mechanical properties of wood plastic composite. *Materials Today: Proceedings. Anais...Elsevier Ltd*, 2020.
- BURGSTALLER, C.; RENNER, K. Water Uptake Behavior of Injection-Molded Wood–Plastic Composites. *Journal of Composites Science*, v. 8, n. 2, 1 fev. 2024.
- CANTO-BORGES, L. C. et al. Sustainable WPC Production: A Novel Method Using Recycled High-Density Polyethylene and Wood Veneer. *Recycling*, v. 9, n. 1, 1 fev. 2024.
- CHAHARMAHALI, M. et al. Mechanical and physical properties of wood-plastic composite panels. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 29, n. 2, p. 310–319, jan. 2010.
- CHAN, C. M. et al. Composites of Wood and Biodegradable Thermoplastics: A Review. *Polymer Reviews*, v. 58, n. 3, p. 444–494, 3 jul. 2018.
- CHENG, Qingzheng et al. Tensile and impact properties of steam-exploded wood-polypropylene composites. *Wood and Fiber Science*, p. 158-164, 2010.
- CHOWDHURY, F. I. et al. Recycled wood plastic biocomposites and development of new materials. Em: *Recycled Plastic Biocomposites Elsevier*, p. 119–145. 2022
- CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA - IV REGIÃO. Plásticos. Disponível em: <https://crgsp.org.br / plasticos /> . Acesso em: 13 nov. 2024
- CORREA, C. A. et al. Compósitos termoplásticos com madeira. *Polímeros*, v. 13, n. 3, p. 154–165, jul. 2003.
- DE BRITO, Juliana Zadi; TRINDADE, Christiane Areias. Compósitos madeira-plástico: tecnologia associada à sustentabilidade. 2023.
- DEL MENEZZI, C. H. S. et al. Thermal modification of consolidated oriented strandboards: Effects on dimensional stability, mechanical properties, chemical

composition and surface color. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 67, n. 4, p. 383–396, nov. 2009.

EFFAH, B.; VAN REENEN, A.; MEINCKEN, M. Mechanical properties of wood-plastic composites made from various wood species with different compatibilisers. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 76, n. 1, p. 57–68, 1 jan. 2018.

ELSHEIKH, A. H. et al. Recent progresses in wood-plastic composites: Pre-processing treatments, manufacturing techniques, recyclability and eco-friendly assessment. *Cleaner Engineering and Technology* Elsevier Ltd, 1 jun. 2022.

EVODE, N. et al. Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, v. 4, 1 dez. 2021.

FENG, L.; XIE, W. Analysis of factors affecting creep of wood– plastic composites. *Forests*, v. 12, n. 9, 1 set. 2021.

FLORES-HERNÁNDEZ, M. Á. et al. Studies on Mechanical Performance of Wood-Plastic Composites: Polystyrene-Eucalyptus globulus Labill. *BioResources*, v. 12, n. 3, p. 6392–6404, 18 jul. 2017.

GARDNER, D. J.; HAN, Y.; WANG, L. Wood–Plastic composite technology. *Current Forestry Reports*, v. 1, n. 3, p. 139–150, 1 set. 2015.

GOMES, J. W. et al. Absorção de água e propriedades mecânicas de compósitos poliméricos utilizando resíduos de MDF. *Polimeros*, v. 27, p. 48–55, 2017.

GUO, D. et al. Improving physical properties of wood–polymer composites by building stable interface structure between swelled cell walls and hydrophobic polymer. *Wood Science and Technology*, v. 55, n. 5, p. 1401–1417, 1 set. 2021.

GUO, G.; FINKENSTADT, V. L.; NIMMAGADDA, Y. Mechanical properties and water absorption behavior of injection-molded wood fiber/carbon fiber high-density polyethylene hybrid composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2019.

HAQ, Shamsul. Effect of materials content on dimensional stability, nano roughness and interfaced morphology for virgin or recycled polypropylene based wood composites. In: *Engineered Wood Products for Construction*. IntechOpen, 2021.

HOFFMANN, C. et al. Foam extrusion of PP-based wood plastic composites with chemical blowing agents and the Celuka technique. *Journal of Cellular Plastics*, v. 53, n. 6, p. 623–638, 1 nov. 2017.

JIAN, B. et al. A Review on Flexural Properties of Wood-Plastic Composites. *Polymers MDPI*, 1 out. 2022.

KALE, A.; CHAUHAN, S. Non-destructive estimation of modulus of elasticity of wood polymer composite. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, v. 14, n. 1, p. 18–23, 1 jun. 2017.

KESKISAARI, A.; KÄRKI, T. 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, 1 jul. 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.

KLYOSOV, A. A. *Wood-Plastic Composites*. John Wiley & Sons, Inc, 2007.

LÓPEZ, D. F.; ROJAS, A. F. Factores que influncian las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de materiales compuestos madero plásticos. *Entre ciencia e ingeniería*, v. 12, n. 23, p. 93–102, 3 mar. 2018.

DA SILVA MISUCOCHI, Luciana Kurack et al. COMPÓSITOS DE FIBRAS MADEIREIRAS: REVISÃO DE ESTUDOS PUBLICADOS DE 2010 A 2018. *Revista Mundi Sociais e Humanidades (ISSN: 2525-4774)*, v. 7, n. 1, 2022.

MORITZER, E.; HOPP, M. Bonding of wood-plastic composites (WPC)—material and surface modification for special applications. *Welding in the World*, v. 61, n. 5, p. 1029–1038, 1 set. 2017.

MURAYAMA, K. et al. Mechanical and physical properties of wood-plastic composites containing cellulose nanofibers added to wood flour. *Forest Products Journal*, v. 68, n. 4, p. 398–404, 2019.

NUKALA, S. G. et al. Preparation and Characterisation of Wood Polymer Composites Using Sustainable Raw Materials. *Polymers*, v. 14, n. 15, 1 ago. 2022.

NÚÑEZ-DECAP, M.; WECHSLER-PIZARRO, A.; VIDAL-VEGA, M. Mechanical, physical, thermal and morphological properties of polypropylene composite materials developed with particles of peach and cherry stones. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 29, 1 set. 2021.

ÖZMEN, Nilgül et al. MDF atıklarının odun plastik kompozitlerin üretiminde değerlendirilmesi. *SDÜ Orman Fakültesi Dergisi*, v. 15, p. 65-71, 2014.

RATANAWILAI, T.; TANEERAT, K. Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites: Effects on mechanical properties and resistance to natural weathering. *Construction and Building Materials*, v. 172, p. 349–357, 30 maio 2018.

REDHWI, H. H. et al. Durability of High-Density Polyethylene (HDPE)- and Polypropylene (PP)-Based Wood-Plastic Composites—Part 1: Mechanical Properties of the Composite Materials. *Journal of Composites Science*, v. 7, n. 4, 1 abr. 2023.

REJEB, M. et al. Effects of coating on the dimensional stability of wood-polymer composites. *Coatings*, v. 11, n. 6, 1 jun. 2021.

RIBEIRO, L. S. et al. Use of Post-Consumer Plastics in the Production of Wood-Plastic Composites for Building Components: A Systematic Review. *Energies Multidisciplinary*

Digital Publishing Institute (MDPI), 1 set. 2023.

SAIN, M.; PERVAIZ, M. Mechanical properties of wood–polymer composites. In: Wood–polymer composites. Woodhead Publishing, p. 101-117. 2008

SANTOS, Anderson Ravik et al. Propriedades dos Compósitos Madeira Plástico e seu uso na Construção de Decks em Substituição às Madeiras Naturais: Uma Revisão. Encontro latino-americano e europeu sobre edificações e comunidades sustentáveis, p. 358-372, 2021.

SCHEEREN, Denise; MENDES MÄHLMANN, Cláudia; 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, 2020.

SHAHANI, S. et al. Preparation and characterisation of sustainable wood plastic composites extracted from municipal solid waste. Polymers, v. 13, n. 21, 1 nov. 2021.

SHAIKH, H. et al. Dynamic and thermo-mechanical properties of polypropylene reinforced with date palm nano filler. Journal of King Saud University - Science, v. 35, n. 3, 1 abr. 2023.

SHIH, Y. F. et al. Application of Sustainable Wood-Plastic Composites in Energy-Efficient Construction. Buildings, v. 14, n. 4, 1 abr. 2024.

TAGHIYARI, Hamid R.; MORRELL, Jeffrey J.; HUSEN, Azamal. Emerging nanomaterials. Opportunities and challenges in forestry sectors. Springer Nature Switzerland AG, Gewerbestrasse, v. 11, p. 6330, 2022.

WECHSLER, A.; HIZIROGLU, S. Some of the properties of wood-plastic composites. Building and Environment, v. 42, n. 7, p. 2637–2644, jul. 2007.

APÊNDICE A

Perfis de densidade dos compósitos

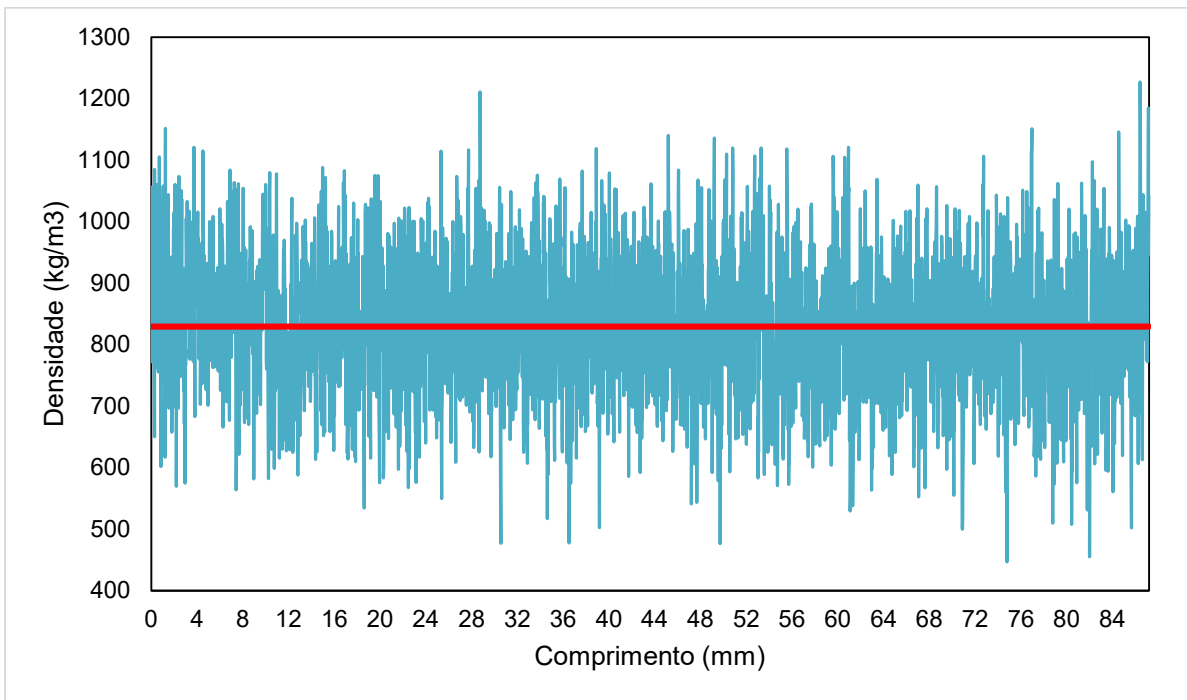


Figura A.1 - Perfil de densidade PP-100

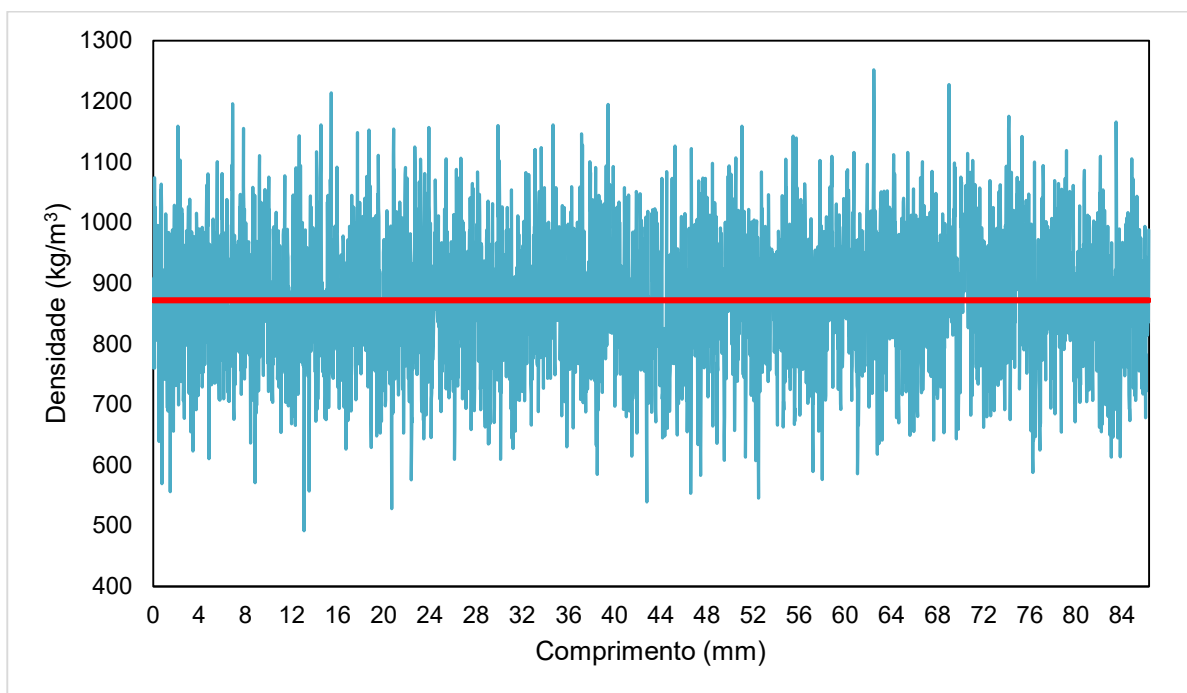


Figura A.2 - Perfil de densidade PEAD-100

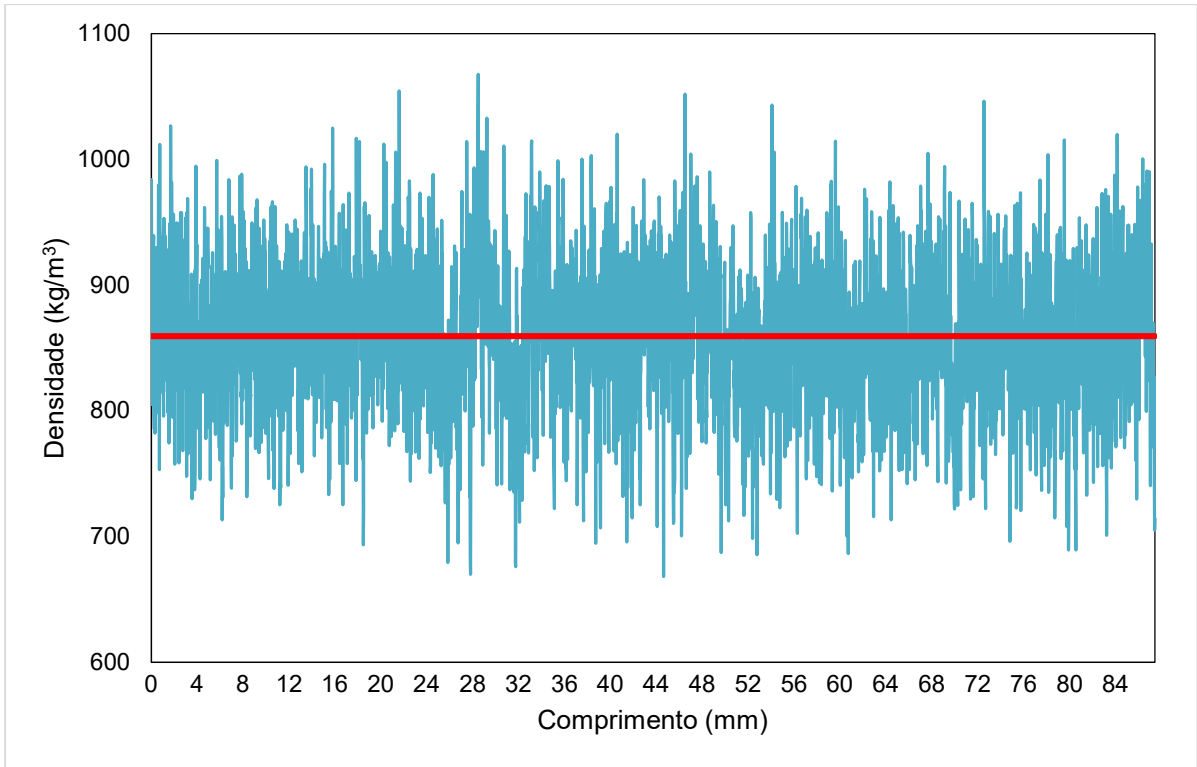


Figura A.3 - Perfil de densidade WPP-15

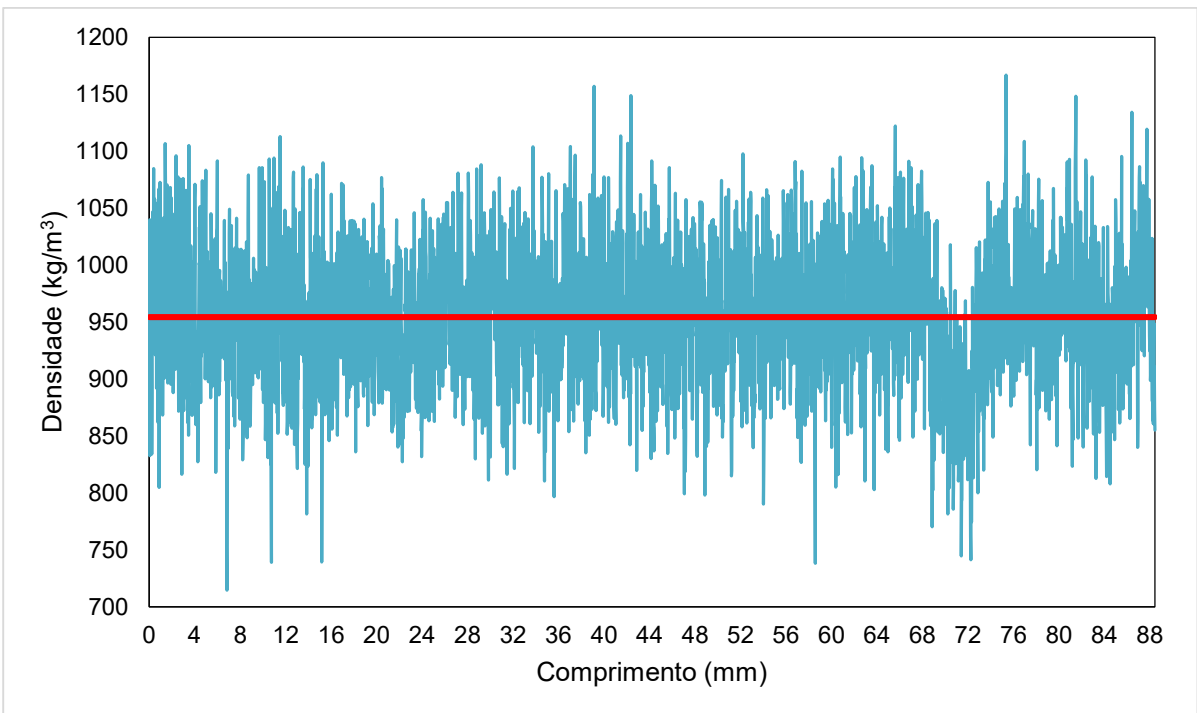


Figura A.4 - Perfil de densidade WPP-30

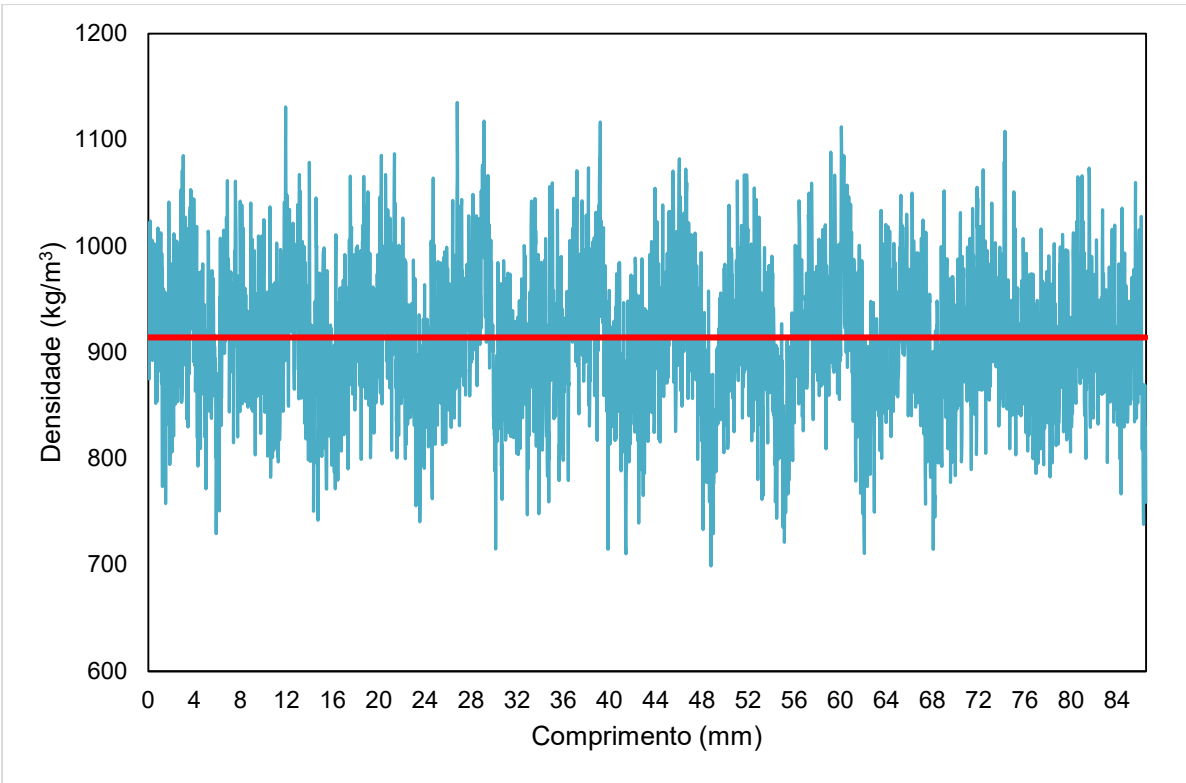


Figura A.5 - Perfil de densidade WPEAD-15

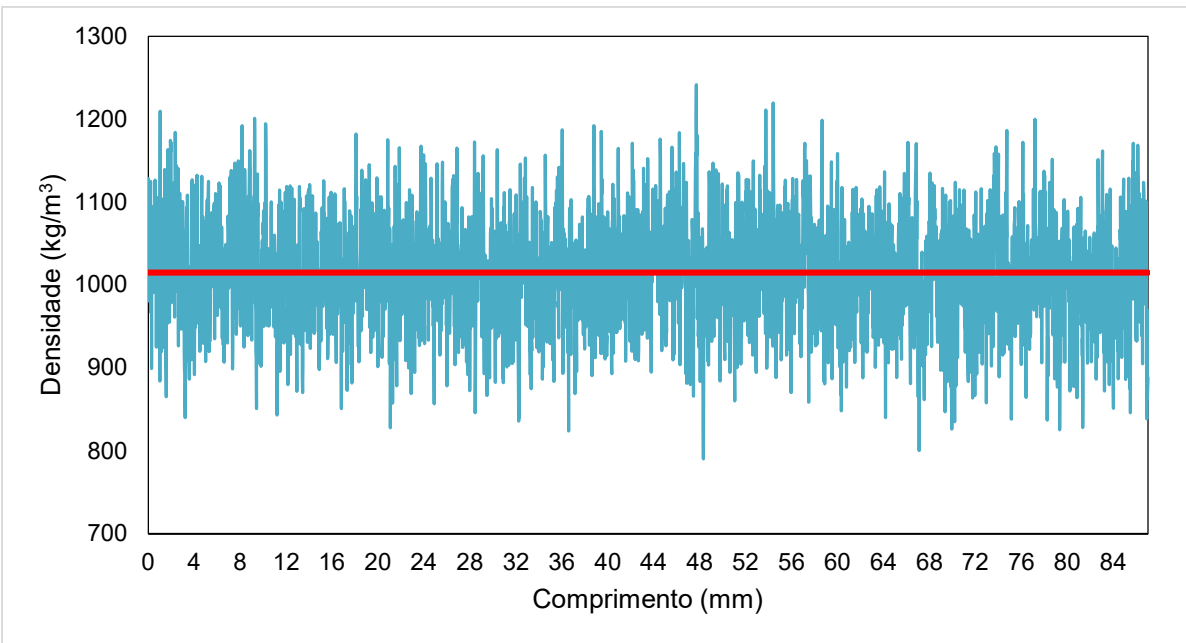


Figura A.6 - Perfil de densidade WPEAD-30

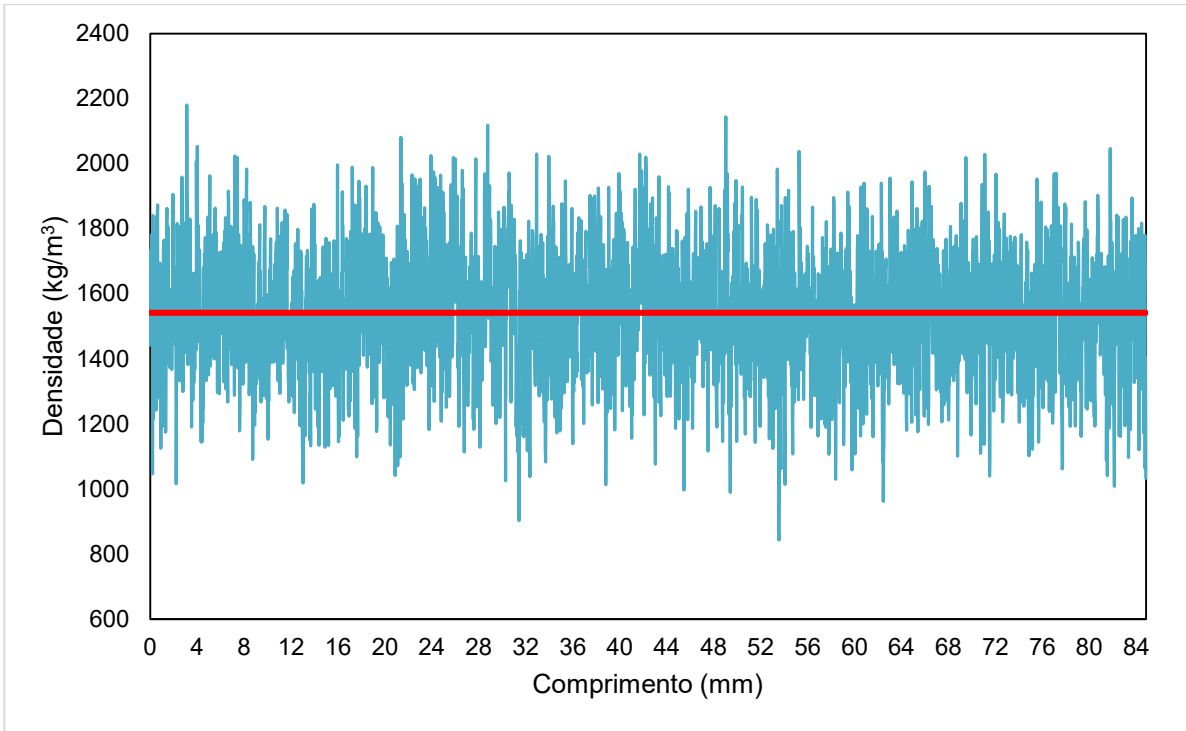


Figura A.7 - Perfil de densidade MDFPP-15

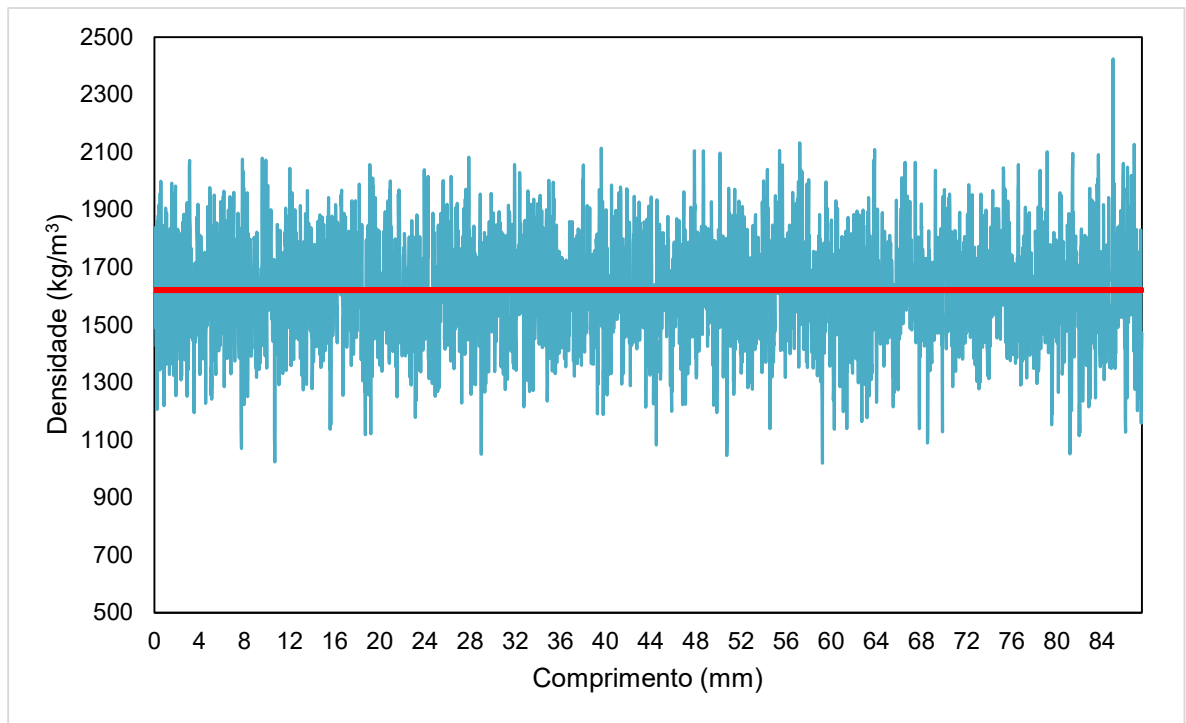


Figura A.8 - Perfil de densidade MDFPP-30

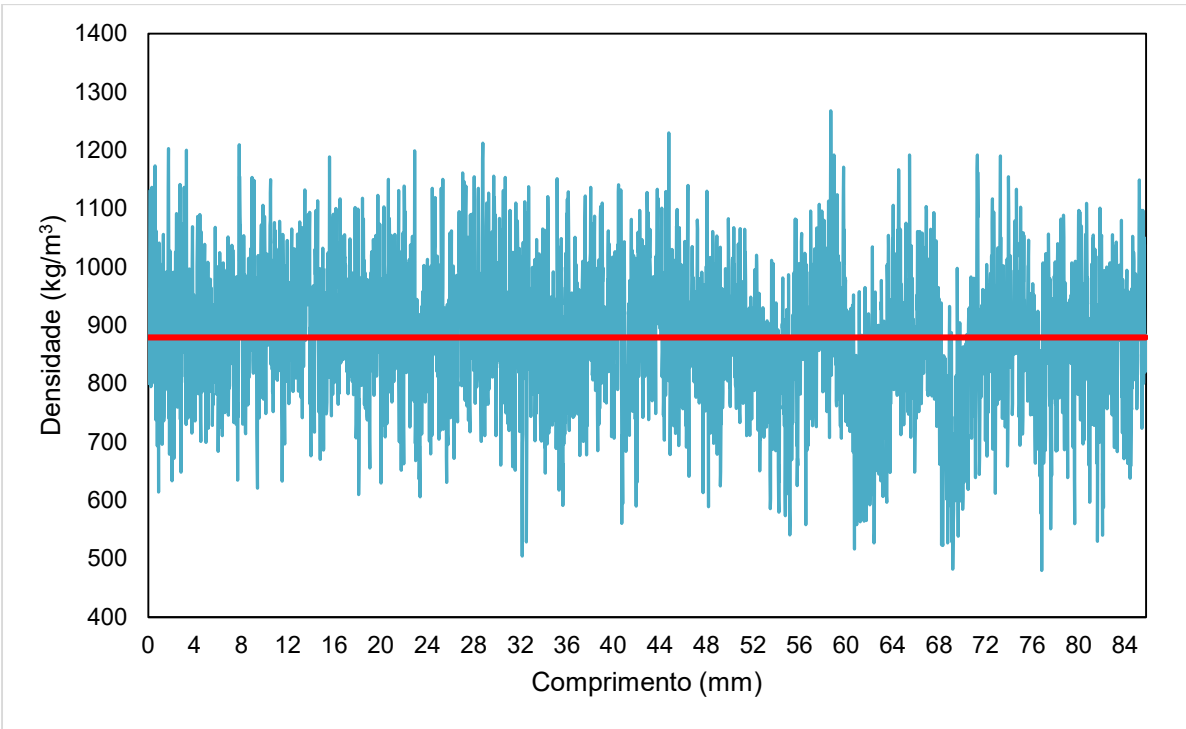


Figura A.9 - Perfil de densidade MDFPEAD-15

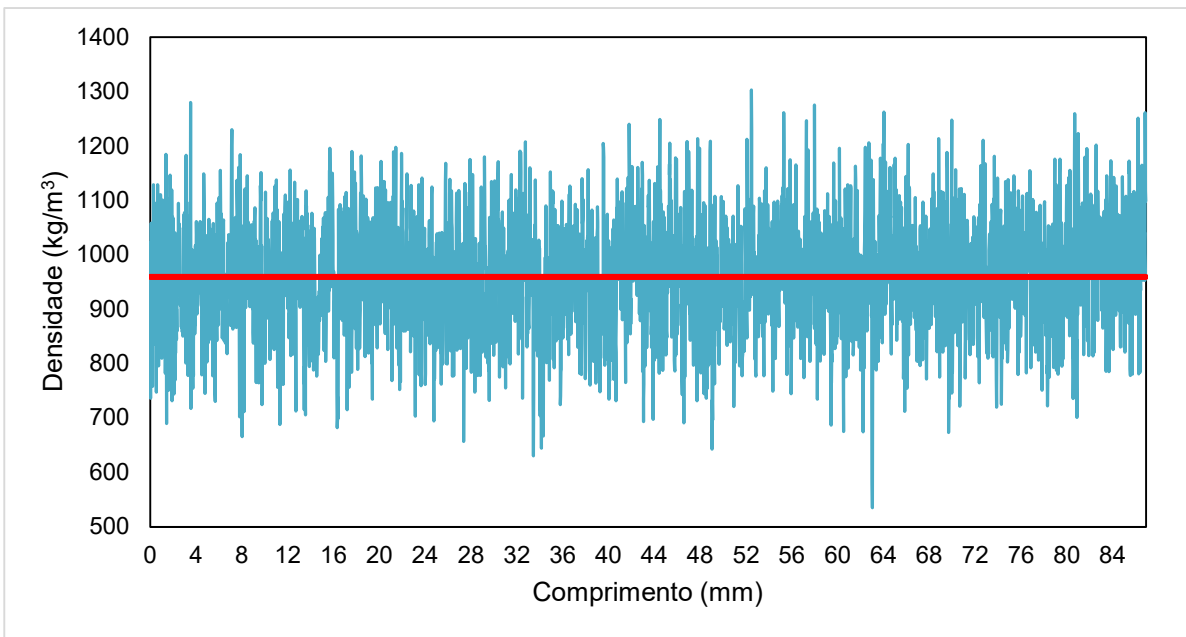


Figura A.10 - Perfil de densidade MDFPEAD-30

APÊNDICE B

Curvas de Resistência à tração (σ_t) x deformação (ϵ)

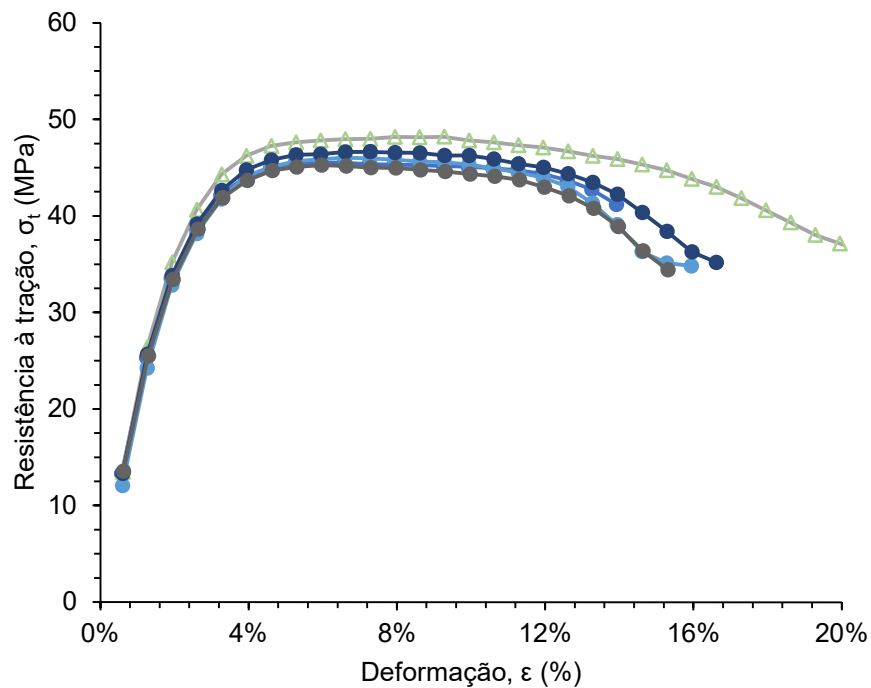


Figura B.1 - Gráfico Resistência à tração x deformação do PP-100

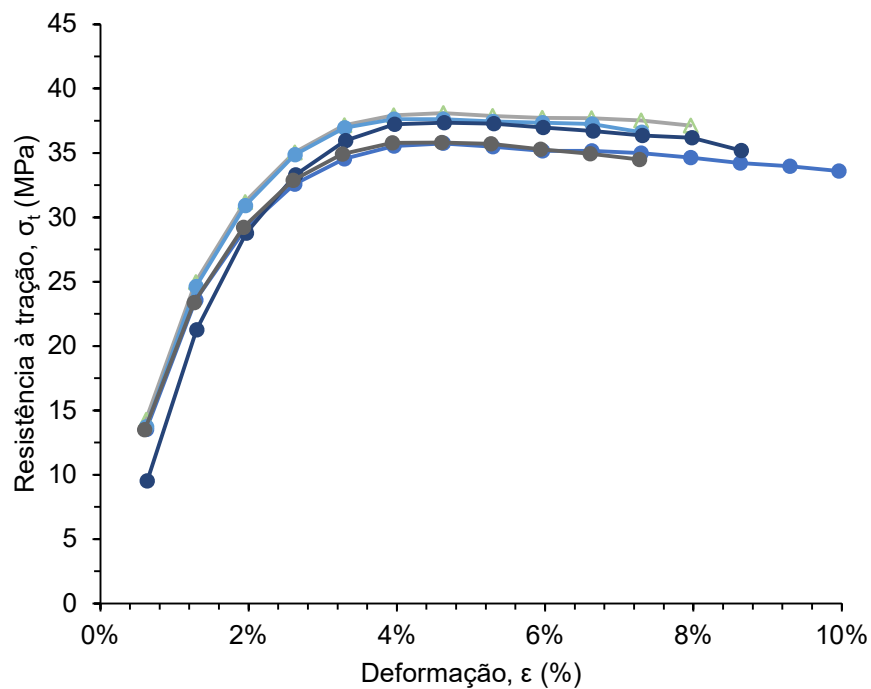


Figura B.2 - Gráfico Resistência à tração x deformação do WPP-15

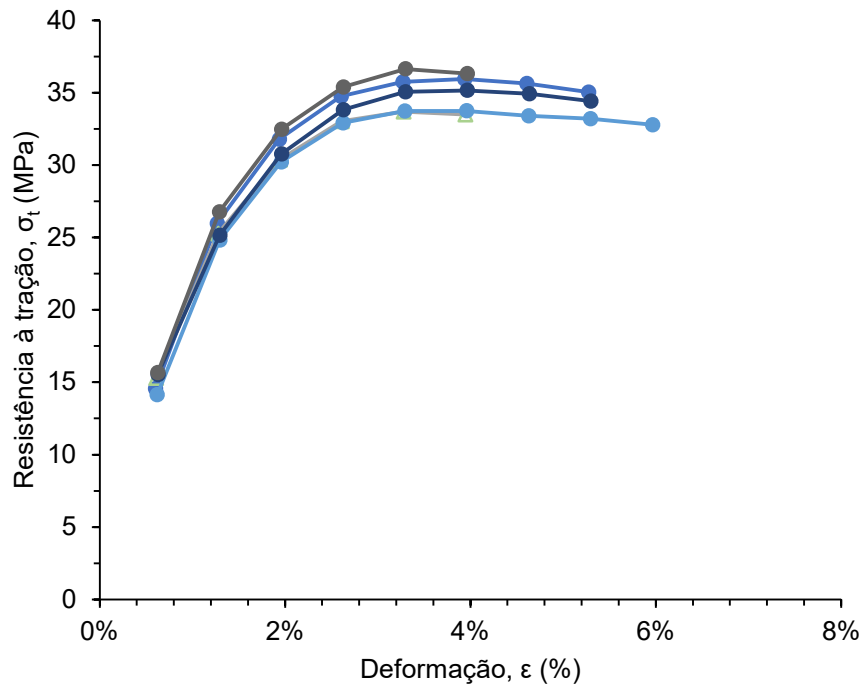


Figura B.3 - Gráfico Resistência à tração x deformação do WPP-30

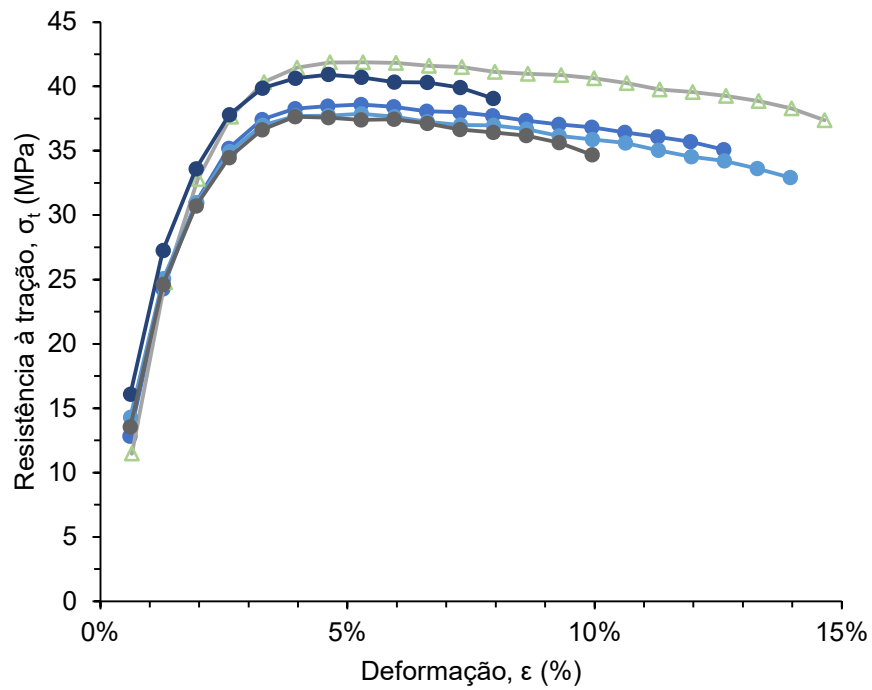


Figura B.4 - Gráfico Resistência à tração x deformação do MDFPP-15

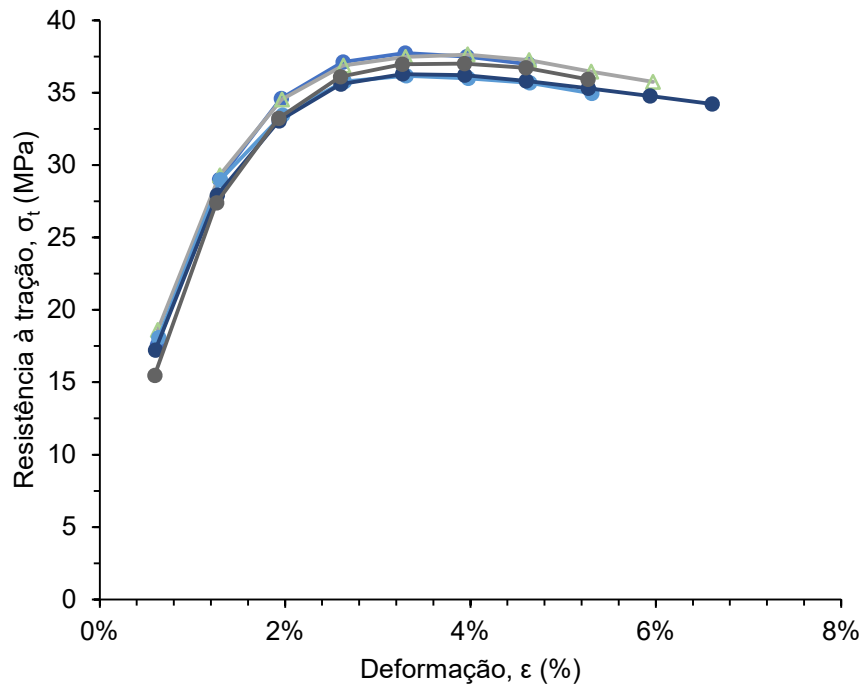


Figura B.5 - Gráfico Resistência à tração x deformação do MDFPP-30

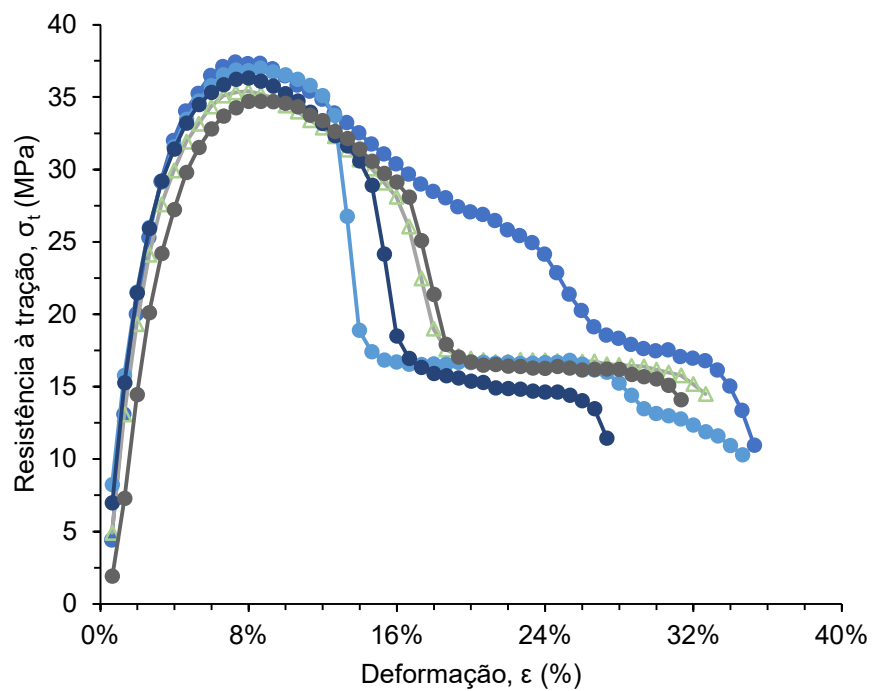


Figura B.6 - Gráfico Resistência à tração x deformação do PEAD-100

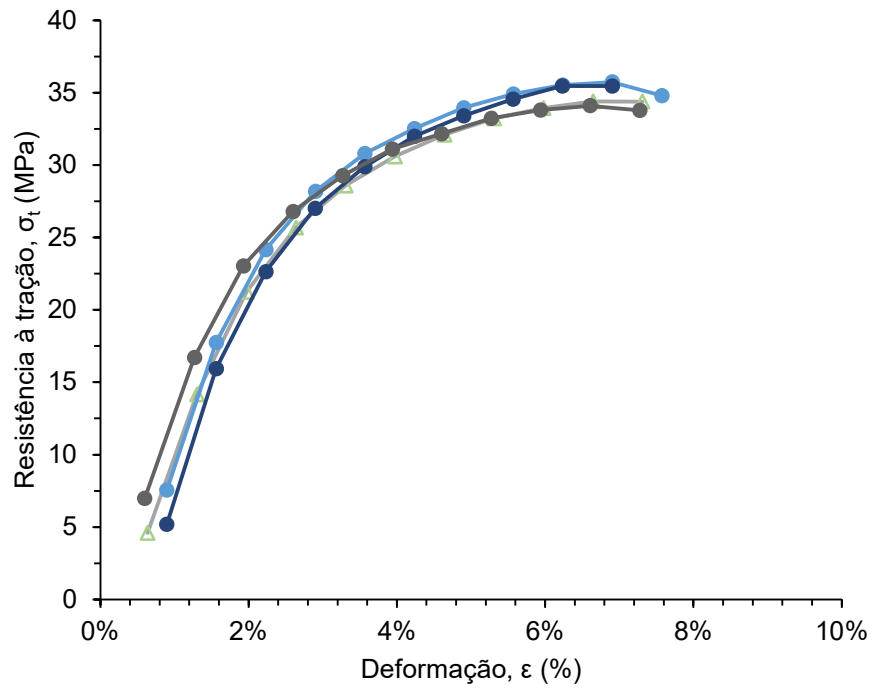


Figura B.7 - Gráfico Resistência à tração x deformação do WPEAD-15

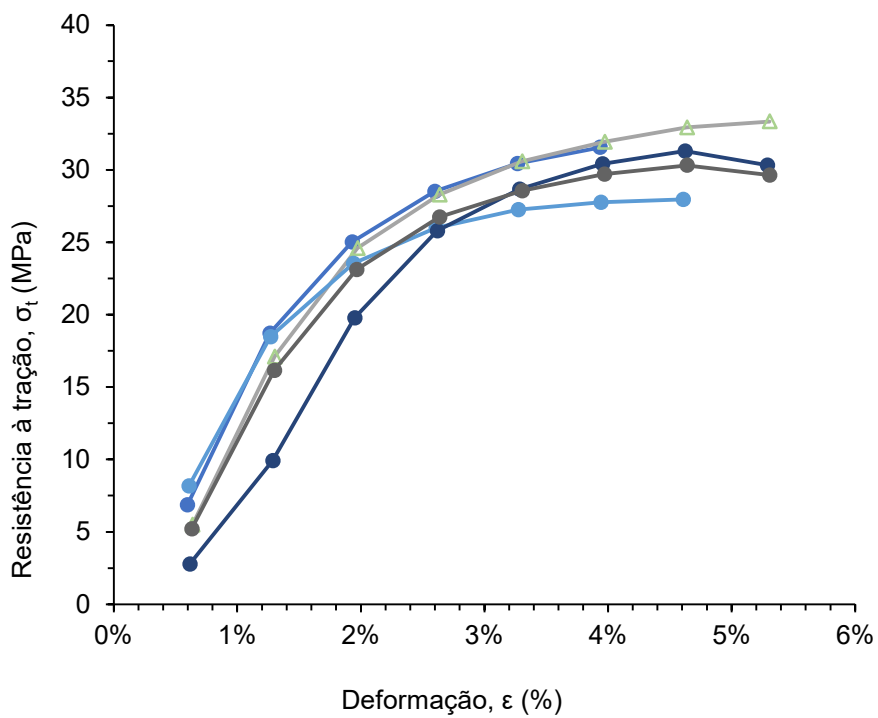


Figura B.8 - Gráfico Resistência à tração x deformação do WPEAD-30

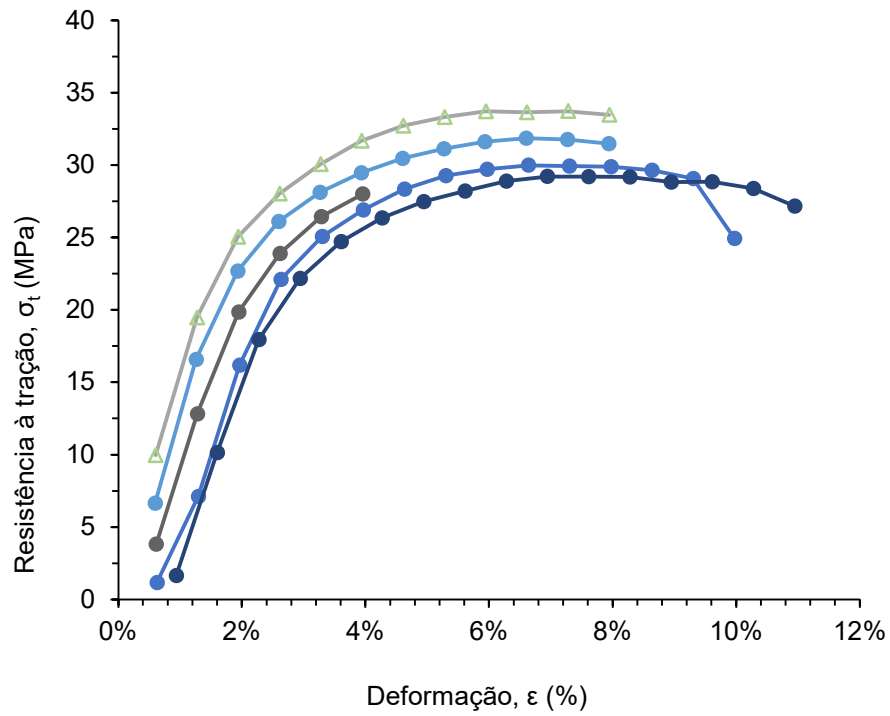


Figura B.9 - Gráfico Resistência à tração x deformação do MDFPEAD-15

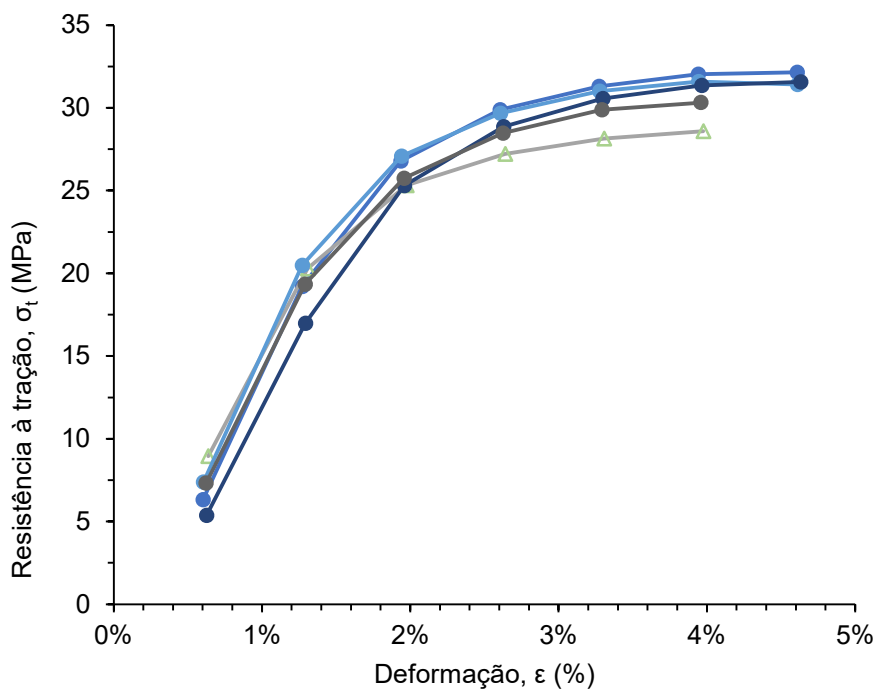


Figura B.10 - Gráfico Resistência à tração x deformação do MDFPEAD-30

APÊNDICE C

Resultados das Análises de Variância

Tabela C.1 - Análise de Variância - Absorção de Água dos compósitos com matriz em PP, n = 3

ANOVA					
	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Treatment	3	1.6685	0.55616	1.6989	0.24392
Residuals	8	2.6189	0.32737		
Total	11	4.2874			

CV = 85,4%

Tabela C.2 - Análise de Variância - Absorção de Água dos compósitos com matriz em PEAD, n = 3

ANOVA					
	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Treatment	3	0.08367	0.027889	0.42644	0.73951
Residuals	8	0.52320	0.065400		
Total	11	0.60687			

CV = 89,21 %

Tabela C.3 - Análise de Variância - MOE dos compósitos com matriz em PP, n = 5

ANOVA					
	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Treatment	4	548666	137167	12.661	2.7021e-05
Residuals	20	216675	10834		
Total	24	765341			

CV = 5,02 %

Tabela C.4 - Análise de Variância - MOE dos compósitos com matriz em PEAD, n = 5

ANOVA					
	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Treatment	4	813122	203281	2.3415	0.089954
Residuals	20	1736352	86818		
Total	24	2549475			

CV = 26,6 %

Tabela C.5 - Análise de Variância - Resistência à tração dos compósitos com matriz em PP, n = 5

ANOVA					
	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Treatment	4	376.82	94.205	55.182	1.5935e-10
Residuals	20	34.14	1.707		
Total	24	410.97			

CV = 3,36 %

Tabela C.6 - Análise de Variância - Resistência à tração dos compósitos com matriz em PEAD, n = 5

ANOVA					
	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Treatment	4	132.80	33.201	12.15	3.5864e-05
Residuals	20	54.65	2.733		
Total	24	187.45			

CV = 5,07 %