

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**PRODUÇÃO DE COMPÓSITO PLÁSTICO-MADEIRA A PARTIR DE RESÍDUOS
DA INDÚSTRIA MADEIREIRA CAPIXABA**

GILSON MENDONÇA DE MIRANDA JÚNIOR

ALEGRE, ES

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA A PARTIR DE RESÍDUOS
DA INDÚSTRIA MADEIREIRA CAPIXABA**

GILSON MENDONÇA DE MIRANDA JÚNIOR

ALEGRE, ES

2025

Gilson Mendonça de Miranda Júnior

**PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA A PARTIR DE RESÍDUOS
DA INDÚSTRIA MADEIREIRA CAPIXABA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Engenharia Química

Linha de Pesquisa: Materiais, Bioprocessos e Meio Ambiente

Orientador: Prof.^a. Dr.^a Rejane Costa Alves

Coorientador: Prof. Dr. Josinaldo de Oliveira Dias

Coorientador: Prof. Dr. Glaucinei Rodrigues Corrêa

ALEGRE, ES

Fevereiro de 2025

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

M539p Mendonça de Miranda Júnior, Gilson, 1994-
Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira capixaba / Gilson Mendonça de Miranda Júnior. - 2025.
117 f. : il.

Orientadora: Rejane Costa Alves.
Coorientadores: Josinaldo de Oliverira Dias, Glaucinei Rodrigues Corrêa.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Materiais. 2. Compostos poliméricos. 3. Resíduos vegetais. 4. Indústria madeireira. 5. Eucalipto. I. Costa Alves, Rejane. II. de Oliverira Dias, Josinaldo. III. Rodrigues Corrêa, Glaucinei. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.


CDU: 66.0

PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA A PARTIR DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA MADEIREIRA CAPIXABA


Gilson Mendonça de Miranda Júnior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química.


Examinada em 12 de fevereiro de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **JOSINALDO DE OLIVEIRA DIAS**
Data: 26/05/2025 10:26:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr., Josinaldo de Oliveira Dias
Universidade Federal do Espírito Santo

Documento assinado digitalmente
 **MICHEL PICANÇO OLIVEIRA**
Data: 27/05/2025 07:56:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr., Michel Picanço Oliveira
Universidade Federal do Espírito Santo

Documento assinado digitalmente
 **EDGAR VLADIMIRO MANTILLA CARRASCO**
Data: 02/06/2025 17:14:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr., Edgar V. Mantilla Carrasco
Universidade Federal de Minas Gerais

"A persistência é o caminho do êxito"

(Charles Chaplin)

AGRADECIMENTOS

Como dizia Ralph Waldo Emerson: “Terminar o momento, encontrar o final da jornada em cada passo do caminho, viver o maior número de boas horas. Isso é sabedoria.” Foi vivendo essas boas horas, com encontros que contribuíram a cada passo, que consegui conquistar o final dessa jornada. Esta experiência foi, sem dúvida, uma oportunidade única de crescimento pessoal e aperfeiçoamento profissional, marcando um momento especial em minha vida.

Quero expressar minha gratidão a:

Deus, que em sua infinita bondade esteve sempre ao meu lado, protegendo e guiando da melhor forma.

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, por me concederem esta oportunidade e disponibilizarem toda a estrutura necessária para o desenvolvimento do estudo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, que contribuíram significativamente para minha formação.

À professora Rejane Costa Alves, pela amizade, disponibilidade, orientação e pelas valiosas lições compartilhadas ao longo desta caminhada.

Ao Laboratório de Experimentação Tridimensional, da Escola de Arquitetura e Design da Universidade Federal de Minas Gerais, por gentilmente disponibilizar suas instalações e equipamentos para a fabricação das placas de compósitos plástico-madeira neste estudo.

Ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira – UFES, pela disponibilização dos laboratórios de Anatomia da Madeira, Biomateriais, Multiusuário de Painéis, e, em especial, ao Laboratório de Experimentação e Múltiplos Usos da Madeira, onde tive a honra de fazer parte.

Ao Departamento de Física - UFES, por disponibilizar o Laboratório de Materiais Carbonosos e Cerâmicos, e ao Daniel F. Cipriano pela atenção prestada.

Ao Departamento de Engenharia Química – UFES, pelo suporte do Laboratório de Análises Químicas e de Caracterização de Materiais.

Ao Laboratório Multiusuário de Instrumentação - LabMInst (LabPetro-UFES, Brasil) pela a realização das análises de FTIR (Technical Cooperation Agreements 0050.0022844.06.4, No. 5900.0112399.19.9, FAPES No. 08/2021 and PRPPG-UFES).

Aos professores Michel, Jordão, meus coorientadores Josinaldo e Glaucinei, que tantas vezes esclareceram minhas dúvidas em suas respectivas áreas, contribuindo para o melhor desenvolvimento deste trabalho.

À FAPES e a CAPES, pelo suporte financeiro essencial para a realização deste trabalho.

A todas as pessoas não citadas que, indiretamente, contribuíram para a execução deste projeto. Um agradecimento especial aos amigos que fiz em Alegre - ES e que levo para a vida.

Aos meus pais, irmã e sobrinho, pelo apoio incondicional, por acreditarem na minha história e por serem a base de toda essa caminhada.

RESUMO

MIRANDA JÚNIOR, Gilson Mendonça de. **PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA A PARTIR DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA MADEIREIRA CAPIXABA**. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES. Orientadora: Rejane Costa Alves. Coorientadores: Josinaldo de Oliveria Dias e Glaucinei Rodrigues Corrêa.

Este estudo investigou a produção de compósitos plástico-madeira (CPM) utilizando resíduos de *Eucalyptus* sp. (RE) provenientes da indústria madeireira capixaba e poli (álcool vinílico) (PVA), com o objetivo de avaliar propriedades químicas, estruturais, físicas e mecânicas, bem como otimizar formulações sustentáveis. Os compósitos foram elaborados em diferentes proporções de resíduo (70%, 60% e 40%) e PVA (30%, 40% e 60%), além de granulometrias distintas (35 e 60 mesh). Os resultados indicaram que o aumento do teor de RE elevou a cristalinidade e a estabilidade térmica dos compósitos, enquanto o PVA aumentou a adesão entre os componentes. Compósitos com maior teor de RE mantiveram as características estruturais e térmicas da lignina e celulose, enquanto aqueles com mais PVA apresentaram menor estabilidade térmica. A proporção de 60% RE e 40% PVA mostrou o melhor equilíbrio, combinando estabilidade térmica, adesão e homogeneidade. Nas análises físicas, os compósitos com mais PVA tiveram maiores valores de estabilidade dimensional, apesar de menores valores de densidade aparente. Os resultados mecânicos destacaram os compósitos com 60% RE e 40% PVA (T2 e T5) como os mais resistentes em tração, compressão, flexão e impacto. A granulometria influenciou significativamente a adesão e a uniformidade do material, com a granulometria de 35 mesh proporcionando melhores resultados em comparação à de 60 mesh. Os resultados demonstram que os CPMs são promissores para aplicações sustentáveis, valorizando resíduos e promovendo a redução de impactos ambientais.

Palavras-chave: Resíduo, *Eucalyptus* sp., polivinil acetato (PVA), compósitos plástico-madeira.

ABSTRACT

MIRANDA JÚNIOR, Gilson Mendonça de. **PRODUCTION OF WOOD-PLASTIC COMPOSITES FROM THE CAPIXABA WOOD INDUSTRY RESIDUES**. 2025. Dissertation (Master's in Chemical Engineering) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES. Advisor: Rejane Costa Alves. Co-advisors: Josinaldo de Oliveira Dias and Glaucinei Rodrigues Corrêa.

This study investigated the production of wood-plastic composites (WPCs) using *Eucalyptus* sp. residues (ER) from the Capixaba wood industry and poly(vinyl alcohol) (PVA), aiming to evaluate chemical, structural, physical, and mechanical properties, as well as to optimize sustainable formulations. The composites were produced with different proportions of residue (70%, 60%, and 40%) and PVA (30%, 40%, and 60%), along with two particle sizes (35 and 60 mesh). The results indicated that increasing the ER content enhanced the crystallinity and thermal stability of the composites, while PVA improved the adhesion between components. Composites with higher ER content preserved the structural and thermal characteristics of lignin and cellulose, whereas those with higher PVA content exhibited lower thermal stability. The 60% ER and 40% PVA ratio showed the best balance, combining thermal stability, adhesion, and homogeneity. In the physical analyses, composites with higher PVA content showed greater dimensional stability, despite presenting lower apparent density values. The mechanical results highlighted the composites with 60% ER and 40% PVA (T2 and T5) as the most resistant in tensile, compression, flexural, and impact tests. Particle size significantly influenced adhesion and material uniformity, with the 35 mesh size yielding better results compared to the 60 mesh. These findings demonstrate that WPCs are promising for sustainable applications, adding value to waste materials and contributing to the reduction of environmental impacts.

Keywords: *Eucalyptus* sp., residue; polyvinyl acetate (PVA); wood-plastic composites (WPCs).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1.	Objetivo Geral	14
1.2.	Objetivos específicos	14
2	RERENCIAL TEÓRICO	15
2.1.	Compósito plástico-madeira	15
2.2.	Resíduos da Indústria Madeireira Capixaba.....	16
2.3.	Matrizes Poliméricas	18
2.3.1.	<i>Poli(álcool vinílico) (PVA)</i>	18
2.4.	Produção de Compósito plástico-madeira.....	19
2.5.	Aplicações de Compósito Plástico-Madeira	20
	REFERÊNCIAS.....	22
	CAPÍTULO 1	28
1	INTRODUÇÃO.....	31
2	MATERIAIS E MÉTODOS	32
2.1.	Produção do Compósito plástico-madeira.....	32
2.2.	Caracterização Química e Estruturais.....	36
2.2.1.	<i>Análise termogravimétrica (TG/DTG)</i>	36
2.2.2.	<i>Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)</i>	37
2.2.3.	<i>Difração de raios-x (DRX)</i>	37
2.2.4.	<i>Ressonância magnética nuclear (RMN)</i>	38
2.2.5.	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	38
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
3.1.	Análise termogravimétrica (TG/DTA)	38
3.2.	Espectroscopia no infravermelho (FTIR).....	44
3.3.	Difração de Raio-X (DRX)	47
3.4.	Ressonância Magnética Nuclear (RMN)	49
3.5.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	52
4	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIAS.....	57
	CAPÍTULO 2	63
1	INTRODUÇÃO.....	66
2	MATERIAIS E MÉTODOS	67

2.1. Produção do Compósito plástico-madeira	67
2.2. Estabilidade Dimensional.....	69
2.2. Ensaio Cíclico	70
2.3. Microdensitometria de Raio-X.....	71
3 RESULTADO E DISCUSSÕES.....	72
3.1. Estabilidade Dimensional.....	72
3.2. Cíclico	77
3.2. Microdensitometria de Raio-X.....	79
4 CONCLUSÃO.....	84
REFERÊNCIAS	85
CAPÍTULO 3.....	88
1 INTRODUÇÃO	91
2 MATERIAIS E MÉTODOS	92
2.1. Produção de Compósito Plástico-Madeira	92
2.2. Caracterização Mecânica do Compósito	94
2.3. Caracterização elástica do compósito	96
3 RESULTADO E DISCUSSÕES.....	99
3.1. Ensaio Mecânicos	99
3.2. Ensaio de propagação de ondas	106
4 CONCLUSÃO.....	112
REFERÊNCIA.....	113
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117

1 INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva da madeira abrange desde a extração até a transformação em produtos finais, envolvendo atividades que variam de pequenas serrarias até grandes empresas de produção em larga escala. Em 2022, a produção de madeira processada mecanicamente no Brasil gerou um valor bruto de produção de R\$ 26,8 bilhões, representando 5,8% do total nacional (ABIMCI, 2022).

Recentemente, o Brasil alcançou o 7º lugar no ranking mundial dos países produtores de madeira. Esse avanço parece continuar, já que, nos últimos cinco anos, o Brasil passou de 310 mil para 2,36 milhões de toneladas de madeira bruta exportadas, resultando em um crescimento de 350% na receita (FORMÓBILE, 2023).

Apesar do avanço econômico, a cadeia produtiva da madeira gera quantidades significativas de resíduos, que nem sempre recebem destinação adequada, tornando o Brasil um dos maiores geradores de resíduos do processamento da madeira (ALMEIDA Jr et al., 2019). Segundo o relatório anual da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), os principais tipos de resíduos incluem cascas, galhos e folhas (57,8%), serragem (21,7%), cavacos residuais (6,6%), licor preto (5,7%), lama de cal e cinza de caldeira (1,0%), e óleos, graxas e embalagens de agroquímicos (0,2%) (IBÁ, 2023). Esses resíduos, em particular, os retalhos e sobras de madeira, são abundantes e apresentam características específicas, como combustibilidade e biodegradabilidade, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004).

No contexto das preocupações ambientais crescentes, a simples escolha de materiais sustentáveis para a produção não é suficiente; é crucial garantir a destinação adequada dos resíduos gerados. O aproveitamento desses resíduos como base para a produção de novos materiais sustentáveis é o foco central desta proposta.

Dessa forma, a produção de compósitos plástico-madeira (CPM) utilizando resíduos provenientes da indústria madeireira do Espírito Santo surge como uma alternativa promissora. Os CPM são materiais compostos por uma matriz polimérica e um reforço, que pode ser adicionado para aumentar a rigidez do material. A matriz pode ser composta por diversos tipos de polímeros, incluindo recicláveis, enquanto o reforço é geralmente composto por resíduos de madeira, mas pode incluir outros materiais celulósicos (CHUIN et al., 2019; KIELING et al., 2019).

A matriz escolhida para o compósito é o Homopolímero de Acetato de Vinila (PVA), um polímero semicristalino, hidrofílico, de baixo custo, atóxico e solúvel em água, com

a capacidade de se biodegradar tanto em condições aeróbicas quanto anaeróbicas (MOUNAYER et al., 2024). A integração do PVA com serragem de madeira apresenta-se como uma alternativa promissora, unindo as propriedades vantajosas do polímero à sustentabilidade proporcionada pelo aproveitamento de um recurso renovável. Essa combinação viabiliza aplicações como materiais de construção sustentáveis e painéis acústicos voltados para controle de ruído (CHERRADI et al., 2025).

O desenvolvimento de produtos a partir de resíduos de *Eucalyptus* sp. (RE) e PVA busca minimizar o desperdício de recursos naturais e criar materiais com manipulação ambiental controlada, promovendo práticas sustentáveis na indústria madeireira e conectando a demanda por biodegradabilidade, com avanços científicos, tecnológicos e econômicos alinhados à preservação ambiental.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é produzir compósitos plástico-madeira utilizando resíduos da indústria madeireira capixaba e polivinil acetato (PVA), avaliando suas propriedades mecânicas, físicas, estruturais e químicas.

1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos podem ser resumidos da seguinte maneira:

- Avaliar a influência das diferentes proporções de PVA e madeira nas propriedades físico-mecânicas e acústicas dos compósitos;
- Determinar as propriedades físicas dos compósitos: densidade aparente, estabilidade dimensional, inchamento após intemperismo e microdensitometria de raio-x;
- Avaliar as propriedades mecânicas, como tração, flexão estática, compressão, impacto de Charpy e arrancamento de parafuso;
- Estimar os valores do módulo de elasticidade dos compósitos utilizando propagação de ondas de excitação e ultrassônicas;
- Caracterizar as propriedades estruturais e químicas do compósito utilizando MEV, DRX, FTIR, RMN e TG;
- Avaliar o impacto das variações granulométricas nas propriedades do material.

2 RERENCIAL TEÓRICO

A pesquisa bibliográfica está focada nos principais conceitos relacionados aos compósitos plástico madeira, abordando a utilização de resíduos da indústria madeireira capixaba como reforço e as possíveis aplicações desse material.

2.1. Compósito plástico-madeira

Compósitos são materiais formados pela combinação de dois ou mais componentes distintos (como matriz e reforço), resultando em propriedades superiores às dos materiais individuais. Eles são amplamente utilizados em setores como aeronáutica, automotivo e construção civil devido à sua alta resistência, leveza e versatilidade (CALLISTER, 2020). O compósito plástico-madeira (CPM) é um biocompósito produzido a partir de materiais à base de madeira (reforço) e polímeros (matriz) (Figura 1), utilizando diversas técnicas de fabricação. Sua preparação ocorre sob condições específicas de calor e pressão (DELVIAWAN et al., 2019).

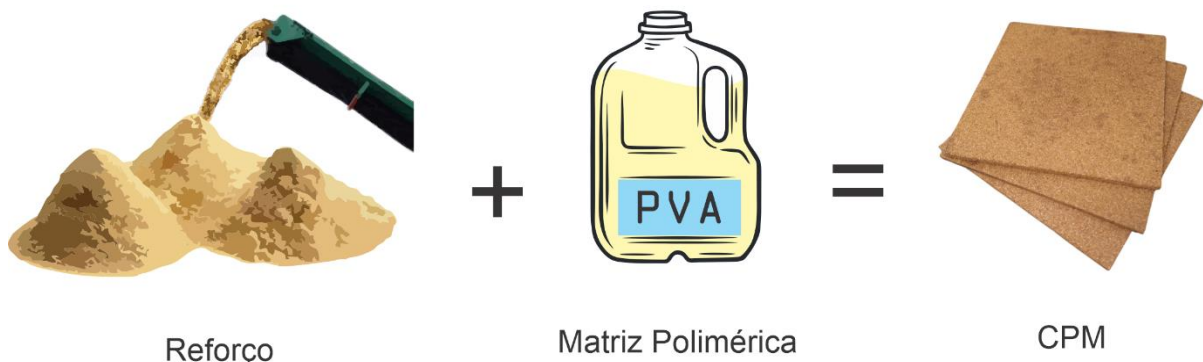


Figura 1 – Representação da combinação reforço e matriz em compósito plástico-madeira.
Fonte: Próprio autor.

A madeira plástica é um produto que vem substituindo a madeira natural em algumas aplicações, oferecendo várias vantagens, o que tem contribuído para sua crescente aceitação no mercado. Uma das principais vantagens é sua resistência a insetos, apodrecimento, umidade e muitos produtos químicos (BRITO et al., 2023).

Apesar da madeira plástica possuir diversas aplicações, ela apresenta limitações, como a variação da qualidade conforme a origem da madeira e época de colheita, a sensibilidade das fibras ao calor, dificuldades de adesão à matriz e a tendência de absorver umidade e sofrer variações dimensionais (ROWELL et al., 2008). O módulo

de elasticidade da madeira plástica é inferior ao da madeira natural, tornando-a mais propensa a deformações, o que limita sua aplicação em estruturas (KRISHNASWAMY et al., 2001).

Os compósitos plástico-madeira podem combinar elementos de madeira com polímeros termofixos (que não podem ser reprocessados) ou termoplásticos (que podem ser remodelados com aquecimento) (FERREIRA, 2022). Em sua grande maioria, a matriz dos CMP é composta de polímeros termoplásticos.

A produção de compósitos poliméricos com reforço lignocelulósico exige conhecimentos em mistura e processamento de polímeros. Para a fabricação industrial, é necessário avaliar toda a cadeia de reciclagem de polímeros termoplásticos e termorrígidos, que inclui coleta, identificação, moagem, lavagem, processamento e comercialização. Diversos tipos de plástico, como PEBD, PEAD, PET, PVC, PP e resinas epóxi, podem ser utilizados na fabricação de madeira plástica (CAVALCANTI et al., 2021)

2.2. Resíduos da Indústria Madeireira Capixaba

Os resíduos sólidos são classificados pela ABNT NBR 10.004 em três categorias principais: Classe I, perigosos, que apresentam características físicas, químicas ou biológicas capazes de causar danos graves à saúde ou ao meio ambiente; A Classe II-A abrange os resíduos não inertes, que podem ser combustíveis, biodegradáveis e apresentar riscos à saúde ou ao meio ambiente, sendo nesta categoria que se enquadram os resíduos da indústria madeireira analisados no presente estudo; e Classe II-B, inertes, que não apresentam riscos significativos ao meio ambiente ou à saúde (ABNT, 2004).

Em 2020, o Espírito Santo possuía cerca de 500 empresas na indústria madeireira, representando 9,77% do total da região Sudeste. Nos últimos dez anos, a área de florestas plantadas com eucalipto no Brasil cresceu aproximadamente 4% ao ano, impulsionada pelos investimentos na indústria de celulose. O Brasil atingiu 9,5 milhões de hectares de florestas plantadas, sendo 78% de *Eucalyptus* sp., 18% de *Pinus* e 4% de outras espécies. O Espírito Santo é o oitavo estado em área plantada com eucalipto, totalizando 231 mil hectares (ABIMCI, 2022).

O processamento da madeira gera uma quantidade significativa de resíduos. Conforme o Plano Nacional de Resíduos Sólidos de 2022, a indústria madeireira

produziu aproximadamente 39,6 toneladas de resíduos, o que representa 3,1% do total dos resíduos industriais das cinco principais categorias geradoras (PNRS, 2022).

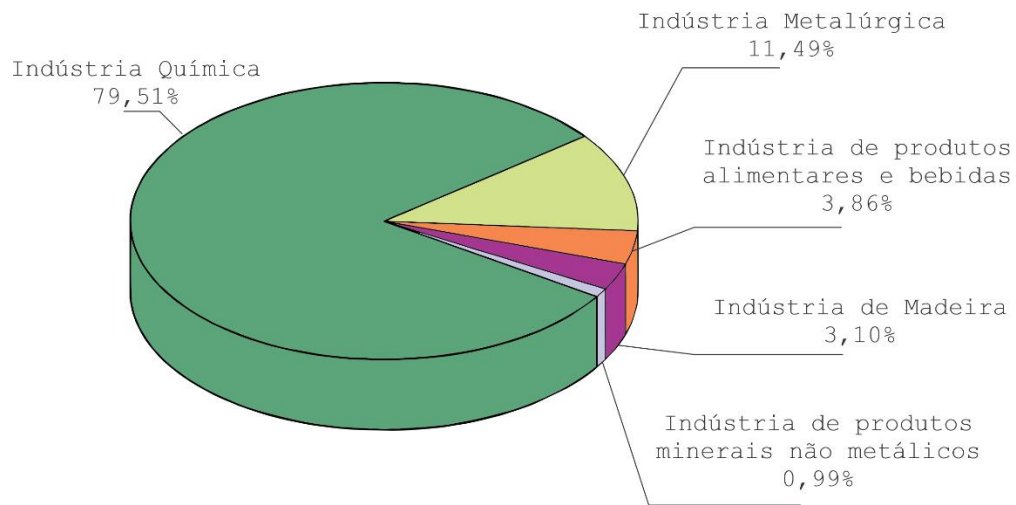


Figura 2 - Cinco principais categorias geradoras de resíduos industriais.

Fonte: Próprio autor.

No processo de transformação da madeira, especialmente pelos consumidores primários, são gerados resíduos como costaneiros, cavacos, aparas, cepilhos, pó de serras e rejeitos (Figura 6) (VASCONCELLOS et al., 2020). Em certas regiões do Estado, as empresas de beneficiamento enfrentam desafios na destinação adequada desses resíduos, devido à falta de empresas locais que realizem a coleta e à ausência de consumidores para esse material, como aqueles que utilizam a combustão para geração de calor. (CEDAGRO, 2024).



Figura 3 – Resíduos gerados no processamento da madeira.

Fonte: Próprio autor.

Os resíduos são compostos por lignocelulose, que possui uma composição química com três polímeros principais: lignina ($C_9H_{10}O_3$, $C_{10}H_{12}O_3$, $C_{11}H_{14}O_4$), hemicelulose

($C_5H_8O_4$) e celulose ($C_6H_{10}O_5$) $_n$. Além desses, há pequenas quantidades de outros compostos, como proteínas, cinzas e pectina. Esses três componentes estão covalentemente ligados, formando uma rede tridimensional complexa conhecida como "complexos lignina-carboidrato" (LCC) (QUINTANA, et al., 2023).

2.3. Matrizes Poliméricas

Os materiais poliméricos empregados como matrizes em compósitos podem ser classificados em duas categorias principais: termorrígidos e termoplásticos (CAVALCANTI et al., 2021). Compósitos com matriz polimérica são especialmente atraentes devido à sua leveza, resistência e rigidez, características que superam as dos polímeros não reforçados e de muitos metais convencionais. Além disso, esses compósitos oferecem a possibilidade de desenvolver componentes com propriedades específicas, ajustadas para diversas aplicações, proporcionando maior liberdade de design (GONÇALVES, 2022).

Entre as matrizes poliméricas mais comumente utilizadas na produção de compósitos plástico-madeira (CMP), destacam-se o polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), polipropileno (PP), poli(ácido-láctico) (PLA), poli(cloreto de vinila) (PVC) e poli(estireno) (PS) (AYANA et al. 2024). Esses polímeros precisam garantir condições adequadas de processabilidade, como temperatura de fusão e pressão, de forma a evitar a degradação térmica dos constituintes da madeira. Dentre os polímeros utilizados, o polivinil acetato (PVA), é reconhecido por sua fácil processabilidade, não toxicidade e excelentes propriedades mecânicas. Além disso, é considerado um estabilizador ecológico e possui propriedades adesivas, sendo eficaz na união de diferentes tipos de materiais (X. ZHU et al., 2022).

A matriz desempenha um papel fundamental em materiais compósitos reforçados com fibras naturais, atuando como uma barreira contra ambientes adversos, protegendo o compósito da umidade e de diversos solventes. Além disso, é responsável pela transferência do esforço aplicado na superfície para as fibras, garantindo a integridade estrutural do material (POLETTI, 2017).

2.3.1. Poli(álcool vinílico) (PVA)

O acetato de vinila é um composto químico amplamente utilizado na indústria, principalmente na produção do poli(acetato de vinila) (PVA). Esse polímero é empregado na fabricação de tintas, adesivos, filmes plásticos flexíveis e até como base para goma de mascar. Suas principais características incluem alta flexibilidade, boa adesão a diferentes superfícies e solubilidade em água quando não totalmente compactado, o que o torna um material versátil para diversas aplicações industriais (ALVARO, 2023).

O poli(álcool vinílico) (PVA) é um polímero sintético não tóxico que apresenta excelente capacidade de formação de filmes e fibras, boa estabilidade química e mecânica, hidroflicidade ajustável, propriedades emulsificantes e adesivas, além de solubilidade em solventes ecologicamente corretos, alta estabilidade térmica e capacidades de separação eficientes (FILIMON, 2025).

2.4. Produção de Compósito plástico-madeira

Os principais métodos de produção de compósitos plásticos de madeira incluem a extrusão, que se destaca como o método mais amplamente utilizado. Além disso, a moldagem por injeção e a moldagem por compressão também se destacam como importantes técnicas de fabricação desses materiais (SANTOS et al., 2021).

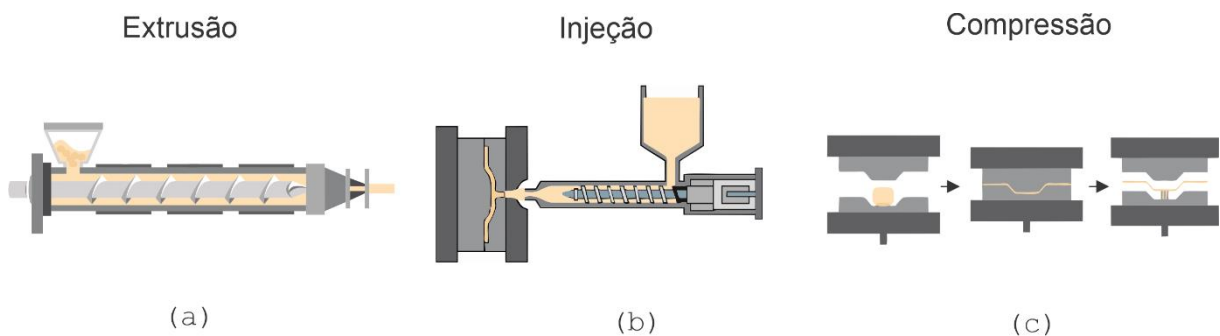


Figura 4 – Métodos de produção de compósitos plástico-madeira: a) Extrusão; b) Injeção; c) Compressão. Fonte: Próprio autor.

O processo de extrusão (Figura 4 – a) mistura fibras de madeira e plástico, aquece a mistura e a força através de um molde para formar o produto. A moldagem por injeção (Figura 4 – b) é um processo no qual um material termoplástico aquecido é injetado sob alta pressão em um molde fechado, onde preenche a cavidade e se solidifica. Após o resfriamento, o molde é aberto e a peça é ejetada (KALPAKJIAN et al, 2014). A moldagem por compressão (Figura 4 – c) foi o método utilizado para a produção do compósito plástico-madeira no presente estudo. Nesse processo, a matriz polimérica

e o material de reforço são colocados em uma cavidade de molde aquecido. A seguir, aplicam-se pressão e calor, o que força os materiais a se distribuírem de forma uniforme pelo molde, garantindo a formação do compósito (YADAV et al., 2021).

2.5. Aplicações de Compósito Plástico-Madeira

A madeira plástica é amplamente utilizada em todo o mundo, predominantemente na forma de placas ocas ou sólidas para decks e outras aplicações, substituindo a madeira tradicional, que é frequentemente extraída de áreas tropicais e mais abundante em determinadas regiões (CAVALCANTE et al., 2021). Exemplos de produtos industrializados a partir de compósitos poliméricos derivados de resíduos lignocelulósicos estão ilustrados na Figura 5.







Fabricantes	Compósito	Aplicações	Imagem
Trex Company, Inc.	PET, PEBD, PEAD, Serragem 95% reciclados	Decks e guarda-corpos	
Inbrasil	PET, PEBD, PEAD, Serragem 95% reciclados	Mobiliário ecológico para áreas públicas e externas	
Ecopex® Ind. e Comércio	PET, PEBD, PEAD, Serragem 95% reciclados	Construção civil, fachadas e revestimentos	
NovoFibre®	Aglutinante e fibra vegetal 95% reciclados	Mobiliário, divisória de parede	
Projeto LIGNO®	PVA e Serragem 95% reciclados	Transformação dos resíduos de madeira em produtos de alto valor agregado	
ORGANOID®	Produtos fabricados a partir de fibras vegetais e resina poliméricas.	Construção civil, painéis e revestimentos	

Figura 5 – Exemplos de Aplicações de Compósitos de Madeira-Plástico.

Fonte: Adaptado CAVALCANTI, 2021.

REFERÊNCIAS

ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. **Estudo Setorial 2022: ano base 2021**. 2022. p. 54-172.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004: Resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

ADLER, E. **Lignin chemistry-past, present and future**. Wood Science and Technology, 1977, p. 169-218.

AGUIAR, N. V. V. et al. **Extração e Caracterização da Lignina da Palha do Milho (Zea mays L.)**. Revista Virtual de Química, v. 12, n. 16, p. 1441-1452, 2020.

AKHTAR, J. et al. **Torrefaction and thermochemical properties of agriculture residues**. Energies, v. 14, n. 14, 2021.

ALMEIDA Jr. et al. **Contribution of ecodesign to the furniture sector: analysis of residues from the furniture pole of Ubá**. Mediação, n. 09, 2019. Disponível em: <https://revista.uemg.br/index.php/mediacao/article/view/4334>. Acesso em: 10 jan. 2025.

ALVARO, Julie. **Acetato de vinila**. Química. Criado em 15 de novembro de 2023. Disponível em: <https://www.quimica.com.br/acetato-de-vinila/>

AMORIM, E. P.; PIMENTA, A. S.; SOUZA, E. C. **Aproveitamento dos resíduos da colheita florestal: o estado da arte e oportunidades**. Research, Society and Development, v. 10, n. 2, 2021.

AQIKALIN, K. **Determination of kinetic triplet, thermal degradation behaviour and thermodynamic properties for pyrolysis of a lignocellulosic biomass.** Bioresource Technology, v. 337, out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE BIOMASSA, PELLETS E BRIQUETES (ABIB). **Projeções de Produção e Consumo de Biomassa, Pellets e Briquetes.** Dados do setor de Biomassa, Pellets e Briquetes no Brasil. Criado em 11 de novembro de 2022. Disponível em: <https://data.gessul.com.br/file/2019/08/30/H163257-F00000-H650.pdf>.

AYANA, K. D.; HA, C.; ALI, A. Y. **Comprehensive overview of wood polymer composite: Formulation and technology, properties, interphase modification, and characterization.** Sustainable Materials and Technologies, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00983>.

BARBOSA et al. **Qualidade de briquetes produzidos a partir do mix de resíduo agroindustrial com eucalipto.** In: OLIVEIRA, R. J. **Recursos Naturais: energia da biomassa florestal.** 1ª ed. Guarujá-SP: Editora Científica, 2021, p. 185-196.

BASU, P. **Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical Design and Theory.** 2ª ed. Elsevier, 2013. 546 p.

BATISTA, J. L.; BRAGHINI JUNIOR, A. **Pellets e briquetes produzidos a partir de resíduos madeireiros como alternativa no mercado global de bioenergia.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 11., 2021 (Online). Artigo.

BES, K. et al. **Extração e caracterização da lignina proveniente do pré-tratamento de biomassa para produção de etanol de 2ª geração.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, n. 1, p. 55-60, 2019.

BRAGA, N. I.; MONTENEGRO, L. R. G. **Efeitos das mudanças climáticas sobre a agropecuária de Minas Gerais: uma abordagem contemporânea.** Novos Cadernos NAEA, v. 23, n. 3, p. 145-165, 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares.** Brasília, DF: MMA, 2022. p. 75-76.

BRITO, J. Z.; TRINDADE, C. A. **Compósitos madeira-plástico: tecnologia associada à sustentabilidade.** Fundação Universidade Federal de Mato Grosso, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/retrieve/3893beeb-048f-4474-ab3d-8c73a14e7c45/820.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2024.

CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G. (2020). **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 10^a ed. Wiley.

CAVALCANTI, W. M.; FERNANDES, M. A. **Produção de Materiais Compósitos a Base de Resíduos Lignocelulósicos: Inovações Recentes, Técnicas e Potenciais Aplicações.** Editpa-Atpin, 2021. DOI: 10.36599/editpa-atpin.005.

CEDAGRO. Centro de Desenvolvimento do Agronegócio. **Plano de Desenvolvimento Florestal do Estado do Espírito Santo.** Vitória-ES, 2024. p. 52-54.

CHERRADI, Y. et al. **Acoustic, mechanical, and thermal characterization of polyvinyl acetate (PVA)-based wood composites reinforced with beech and oak wood fibers.** Polymers, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17020142>.

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.

DELVIAWAN, A.; KOJIMA, Y.; KOBORI, H.; SUZUKI, S.; AOKI, K.; OGOE, S. **The effect of wood particle size distribution on the mechanical properties of wood-plastic composite.** *Journal of Wood Science*, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1846-9>.

FERREIRA, R. S. **Preparo e Caracterização de um Compósito Plástico Madeira a Base de Resíduos de Eucalipto/Fibra de Vidro/Polietileno de Alta Densidade.** 2022. 27 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais (PPGCEM) – UTFPR.

Filimon, A.; Dobos, AM; Onofrei, MD; Serbezeanu, D. **Membranas à base de álcool polivinílico: uma revisão do progresso da pesquisa em design e modelagem preditiva de propriedades para aplicação direcionada.** *Polymers* 2025, 17, 1016.
<https://doi.org/10.3390/polym17081016>

FORMÓBILE. **Dados sobre o mercado de exportação de madeiras.** Disponível em: <https://digital.formobile.com.br/especiais/dados-sobre-o-mercado-de-exportacao-de-madeiras/>. Acesso em: 10 jul. 2023.

GONÇALVES, M. R. S. **Desenvolvimento de Sistema de Visão Termográfico para Detecção de Defeitos em Materiais Compósitos de Matriz Polimérica.** Dissertação de Mestrado. Universidade NOVA, Lisboa, set. 2022.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2023.** 2023. p. 58.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Engenharia e Tecnologia de Manufatura**. Pearson, 2014.

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

KRISHNASWAMY, P.; LAMPO, R. **Recycled-Plastic Lumber Standards: From Waste Plastics to Markets for Plastic Lumber Bridge**. Standardization News, v. 2, 2001. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=84820f55314a53f7dbcedcded5d64f1316f1cacf>. Acesso em: 26 ago. 2024.

LI, H. et al. **Métodos para aumentar a reatividade da polpa dissolvida no processo de produção de rayon viscoso: uma revisão**. Celulose, v. 25, p. 3733-3753, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1840-1>.

M., P.; B., P.; S., C.; M., P. **Lightweight composite materials for automotive: a review**. Carbon, v. 1, n. 2500, p. 151, 2018.

MOUNAYER, N. et al. **Encapsulation of hydrogen peroxide in PVA/PVP hydrogels for medical applications**. Gels, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/gels11010031>.

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

QUINTANA, E.; VALLS, C.; RONCERO, B. **Dissolving-grade pulp: a sustainable source for fiber production**. Wood Science and Technology, v. 58, p. 23-85, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-023-01519-w>.

ROWELL, R. M. **Fibras naturais: tipos e propriedades.** In: PICKERING, K. L. (Ed.). **Propriedades e desempenho de compósitos de fibras naturais.** Boca Raton: Woodhead Publishing, 2008. p. 3-66.

SANTOS, A. R. et al. **Propriedades dos Compósitos Madeira-Plástico e seu Uso na Construção de Decks em Substituição às Madeiras Naturais: Uma Revisão.** Anais do IV EURO ELECS, 2021. p. 359-372.

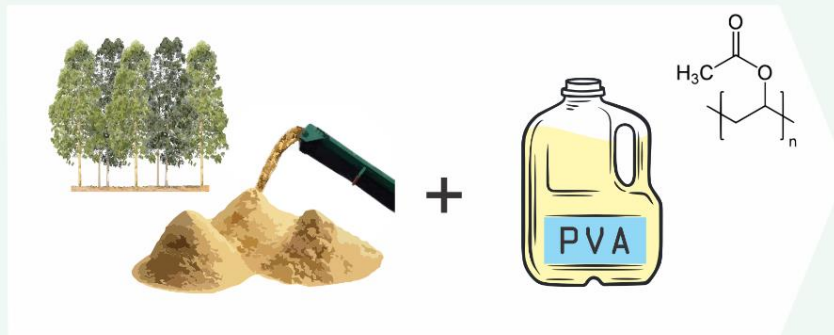
VASCONCELLOS, M. S.; OLIVEIRA, E. C. **Timber Solid Waste Management: Study in Timber Companies in the Municipality of Buri – SP.** Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 10, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n10-296.

YADAV, S. M.; LUBIS, M. A. R.; SIHAG, K. **A Comprehensive Review on Process and Technological Aspects of Wood-Plastic Composites.** Jurnal Sylva Lestari, v. 9, n. 1, p. 329-356, maio 2021.

ZHU, X. et al. **Effect of Curing Condition on the Compressive Mechanical Behavior of Clayey Soil Stabilized with Liquid Polymer.** International Journal of Polymer Science, v. 2022, p. 1-13, maio 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/9031369>.

CAPÍTULO 1

Graphical Summary



Benefits



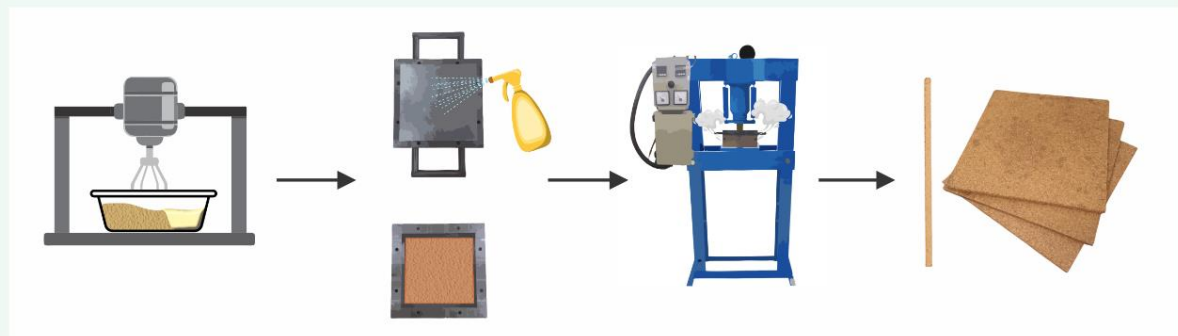
Sustainability



Innovation

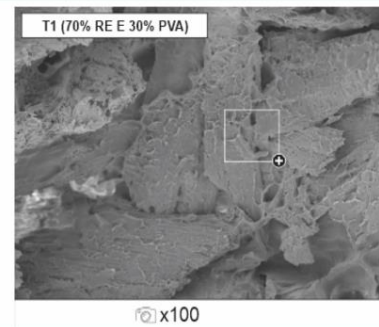
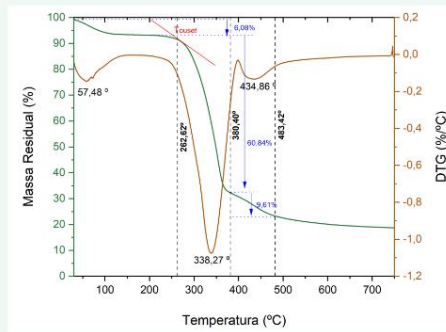


Low cost



Essays

TG/DTG
MEV
DRX
RMN
FTIR



Caracterização Estrutural e Química de Compósitos Plástico-Madeira Produzidos a partir de Resíduos da Indústria Madeireira Capixaba

RESUMO

Este estudo investiga a produção de compósitos plástico-madeira a partir de resíduos de *Eucalyptus sp.* (RE) e polivinil acetato (PVA), com o objetivo de avaliar as propriedades químicas e estruturais dos compósitos obtidos. A pesquisa é motivada pela necessidade de valorizar resíduos da indústria madeireira capixaba, contribuindo para a sustentabilidade. Os compósitos foram elaborados em diferentes proporções de RE (70%, 60% e 40%) e PVA (30%, 40% e 60%), e para caracterizá-los foram realizados ensaios de análise térmica (TG), espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), difração de raios-X (DRX), ressonância magnética nuclear (RMN) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados da TG indicaram que o aumento do PVA reduziu a estabilidade térmica, com compósitos de 70% RE e 30% PVA apresentando maior temperatura de início de decomposição (251,63 °C), enquanto aqueles com 40% RE e 60% PVA tiveram menor estabilidade (262,62 °C). A DRX mostrou aumento da cristalinidade com o teor de RE, e o RMN CP/MAS ¹³C confirmou que o PVA somou ao material amorfo na celulose, evidenciada pelo aumento dos picos amorfos (C4a e C6a). O FTIR detectou a formação de ligações de hidrogênio entre o PVA e os grupos hidroxila do RE. A MEV revelou que a adesão interfacial melhorou com o aumento do PVA: compósitos com 70% RE e 30% PVA apresentaram falhas na interface, enquanto aqueles com 60% RE e 40% PVA exibiram maior cobertura dos resíduos pela matriz, ainda com descontinuidades, e compósitos com 40% RE e 60% PVA mostraram interface mais coesa e homogênea. A proporção de 60% RE e 40% PVA destacou-se por equilibrar interações químicas e adesão interfacial, demonstrando potencial para aplicações sustentáveis na valorização de resíduos madeireiros.

Palavras-chave: Resíduo, eucalipto, polivinil acetato (PVA), Compósitos plástico-madeira;

Structural and Chemical Characterization of Wood-Plastic Composites Produced from Residues of the Capixaba Wood Industry

ABSTRACT

This study investigates the production of wood-plastic composites (WPCs) from *Eucalyptus* sp. residues (ER) and polyvinyl acetate (PVA), aiming to evaluate the chemical and structural properties of the resulting materials. The research is driven by the need to valorize residues from the Capixaba wood industry, contributing to sustainability. The composites were produced with varying proportions of ER (70%, 60%, and 40%) and PVA (30%, 40%, and 60%), and were characterized through thermal analysis (TG), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), solid-state nuclear magnetic resonance (NMR), and scanning electron microscopy (SEM). TG results indicated that increasing the PVA content reduced thermal stability, with composites containing 70% ER and 30% PVA showing the highest onset decomposition temperature (251.63 °C), while those with 40% ER and 60% PVA exhibited lower stability (262.62 °C). XRD revealed increased crystallinity with higher ER content, and CP/MAS ¹³C NMR confirmed that PVA contributed to the amorphous regions in cellulose, evidenced by the increase in amorphous peaks (C4a and C6a). FTIR analysis detected the formation of hydrogen bonds between PVA and the hydroxyl groups in ER. SEM images showed improved interfacial adhesion with increasing PVA content: composites with 70% ER and 30% PVA exhibited interfacial flaws; those with 60% ER and 40% PVA showed greater residue coverage by the matrix, though with some discontinuities; and composites with 40% ER and 60% PVA presented a more cohesive and homogeneous interface. The 60% ER and 40% PVA ratio stood out by balancing chemical interactions and interfacial adhesion, demonstrating potential for sustainable applications in wood residue valorization.

Key words: Residue, *Eucalyptus*, polyvinyl acetate (PVA), wood-plastic composites.

1 INTRODUÇÃO

A indústria madeireira, baseada em florestas plantadas e manejadas, desempenha um papel crucial no Estado do Espírito Santo, sendo uma importante fonte de recursos econômicos. Em 2022, a produção de madeira processada mecanicamente gerou um valor bruto de R\$ 26,8 bilhões, correspondendo a 5,8% do total nacional (ABIMCI, 2022). No entanto, a cadeia produtiva da indústria moveleira é responsável pela geração de grandes quantidades de resíduos de madeira, que nem sempre são gerenciados de forma adequada, colocando o Brasil como um dos principais geradores desses resíduos (ALMEIDA Jr et al., 2019).

Os principais resíduos gerados incluem pó de lixa, serragem, retalhos e sobras de madeira, solventes e água de cabine de pintura (TRANSRESIND, 2021). Dentre esses, os retalhos e sobras de madeira são os mais abundantes. Conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), esses resíduos apresentam características como combustibilidade e biodegradabilidade.

Diante das questões ambientais, é fundamental não apenas utilizar materiais sustentáveis, mas também garantir a destinação adequada dos resíduos provenientes da produção. O reaproveitamento desses resíduos para o desenvolvimento de novos materiais sustentáveis é o foco principal desta proposta. Nesse contexto, os gestores da indústria moveleira enfrentam o desafio de conciliar a eficiência operacional com a necessidade premente de adotar práticas que minimizem o impacto ambiental (TONZAR, 2024).

A produção de compósitos plástico-madeira (CPM) a partir de resíduos da indústria madeireira do Espírito Santo apresenta-se como uma solução promissora. O poli(álcool vinílico) (PVA) surge como alternativa para compósitos sustentáveis devido à sua biodegradabilidade, baixa toxicidade e excelente compatibilidade com fibras naturais. Estudos anteriores com resíduos madeireiros focaram principalmente em matrizes poliméricas convencionais, com limitações ambientais. Neste contexto, a combinação de resíduos de *Eucalyptus sp.* (RE) com PVA representa uma abordagem inovadora que visa minimizar o desperdício de recursos naturais, mas também desenvolver materiais com degradação controlada no meio ambiente.

A caracterização química e estrutural dos compósitos plástico-madeira é fundamental para entender as interações entre a matriz polimérica e os resíduos lignocelulósicos, além de avaliar como a formulação e os parâmetros do processo influenciam a

qualidade dos compósitos finais (RAMESH et al., 2022). Nesse contexto, este estudo busca produzir e caracterizar compósitos plástico-madeira com diferentes concentrações, investigando a composição química dos principais componentes e suas propriedades termogravimétricas e morfológicas, contribuindo para o desenvolvimento de materiais mais eficientes e sustentáveis.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Produção do Compósito plástico-madeira

A matriz selecionada foi o homopolímero de acetato de vinila, um adesivo em emulsão aquosa à base de polivinil acetato (PVA) da marca ChemTrend (Deurowood WR-38009W), com concentração variando de 45% a 47%. Este material é um líquido viscoso de coloração amarelada, com pH entre 4,00 e 6,00. Possui ponto de fulgor superior a 130°C, densidade específica (a 25°C) de 1,060 a 1,100 g/cm³, viscosidade Brookfield RVT de 45% a 47%, biodegradabilidade superior a 90% (segundo o teste Zahn-Wellens), DQO de 2.090 mg/g e DBO³ de 100% (FISPQ, 2021). O reforço na preparação do composto consiste em resíduos de madeira de *Eucalyptus* sp., não tratados e provenientes de fontes virgens.

Os resíduos de eucalipto (RE) foram coletados em uma serraria na localidade de Rive, no município de Alegre, Espírito Santo. Os resíduos estavam úmidos e apresentavam-se em vários tamanhos. Os RE foram submetidos a um processo de secagem em estufa com circulação e renovação de ar, marca SolidSteel, modelo SSDicr – 280L, a 100°C por 24 horas. Este processo foi realizado no Laboratório de Experimentação e Múltiplos Usos da Madeira, do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), em Jerônimo Monteiro, Brasil.

Após a secagem, os resíduos de eucalipto (RE) foram triturados em um moinho de facas tipo Croton, marca Marconi, modelo MA580, no Laboratório de Usinagem da Madeira (Marcenaria) do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), em Jerônimo Monteiro, Brasil. O material foi triturado para obter granulometrias distintas.

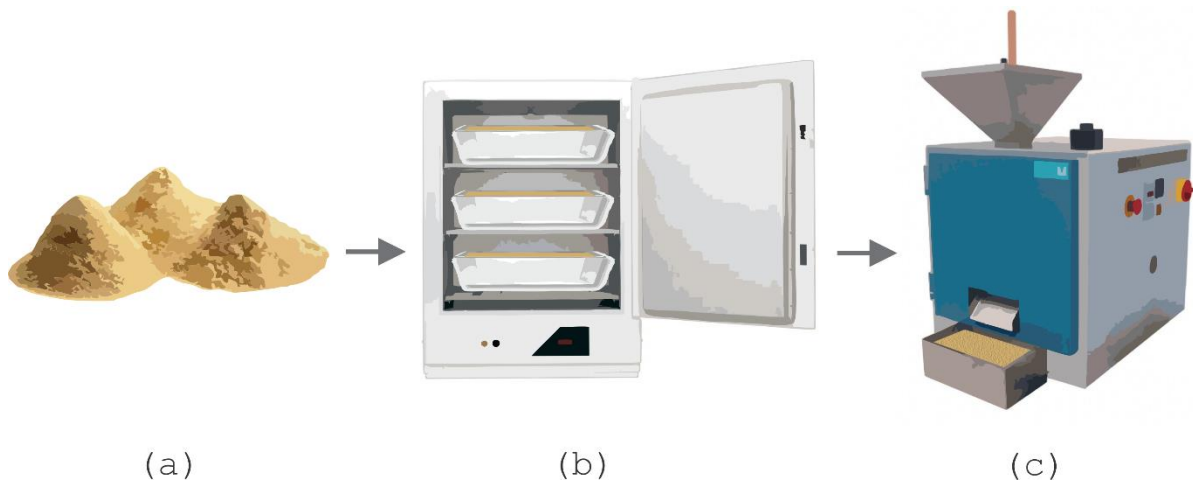


Figura 1 – Representação esquemática do processo inicial (a) resíduos, (b) secagem em estufa, (c) trituração no moinho de facas. Fonte: próprio autor

Após a trituração, os resíduos foram peneirados utilizando um agitador de peneiras da marca Bertel, no Laboratório de Engenharia Química 5 (LEQ5), do Departamento de Engenharia Química da UFES, em Alegre - ES, Brasil. Foram utilizadas malhas de 20, 35 e 60 mesh, sendo selecionadas as frações granulométricas retidas nas malhas de 35 e 60 mesh para os experimentos.

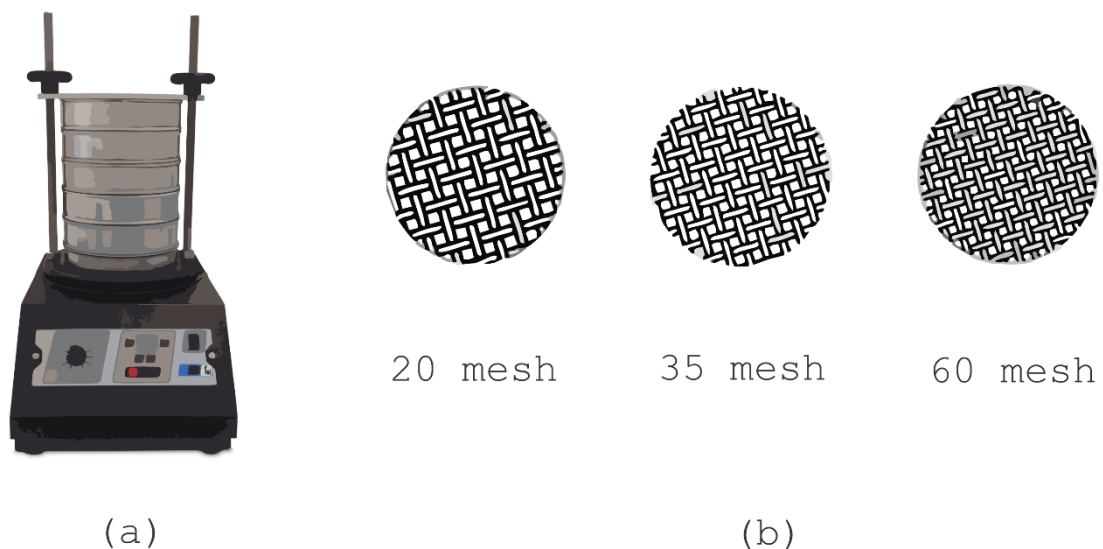


Figura 2 – Representação esquemática (a) peneira automática, (b) malhas. Fonte: próprio autor.

O compósito plástico-madeira foi produzido no Laboratório de Experimentação Tridimensional (LET) da Escola de Arquitetura e Design da Universidade Federal de

Minas Gerais. Para a fabricação, foi utilizada uma prensa hidráulica Bovenau (modelo P30000), com capacidade de 30 toneladas. O molde fechado possui resistências elétricas distribuídas, duas no molde superior e duas no inferior, garantindo estabilidade térmica. Um controlador digital ajusta a temperatura conforme as necessidades de cada material. O molde utilizado possui uma área de 289 cm², resultando em placas com dimensões de 170x170x6 milímetros (largura, comprimento e espessura).

As placas foram fabricadas com várias proporções de resíduos de eucalipto (RE) e polivinil acetato (PVA), utilizando granulometrias de 35 e 60 mesh. Foram estabelecidos os seguintes tratamentos:

Tabela 1 – Distribuição dos tratamentos por proporção RE/PVA e granulometria.

Proporções	35 MESH	60 MESH
70% RE e 30% PVA	Tratamento 1	Tratamento 4
60% RE e 40% PVA	Tratamento 2	Tratamento 5
40% RE e 60% PVA	Tratamento 3	Tratamento 6

Fonte: próprio autor.

Para a fabricação das placas, foi realizada a pesagem do resíduo de eucalipto e da matriz polimérica com o objetivo de atingir uma densidade alvo de 650 kg/m³. A tabela a seguir apresenta os valores em gramas correspondentes a cada tratamento.

Tabela 2 – Valores em gramas correspondentes a cada Tratamento.

Tratamentos	Resíduos de Eucalipto	PVA
1 e 4	147 g	63g
2 e 5	126 g	84g
3 e 6	84 g	126g

Fonte: próprio autor.

Foi utilizado um misturador portátil e um recipiente para garantir que a mistura fosse completamente homogeneizada, assegurando a uniformidade na distribuição dos componentes. Em seguida, aplicou-se o desmoldante PURA 28014W da Chem Trend nos moldes superior e inferior para evitar a aderência do material. Após a aplicação do desmoldante, a mistura foi depositada nos moldes.

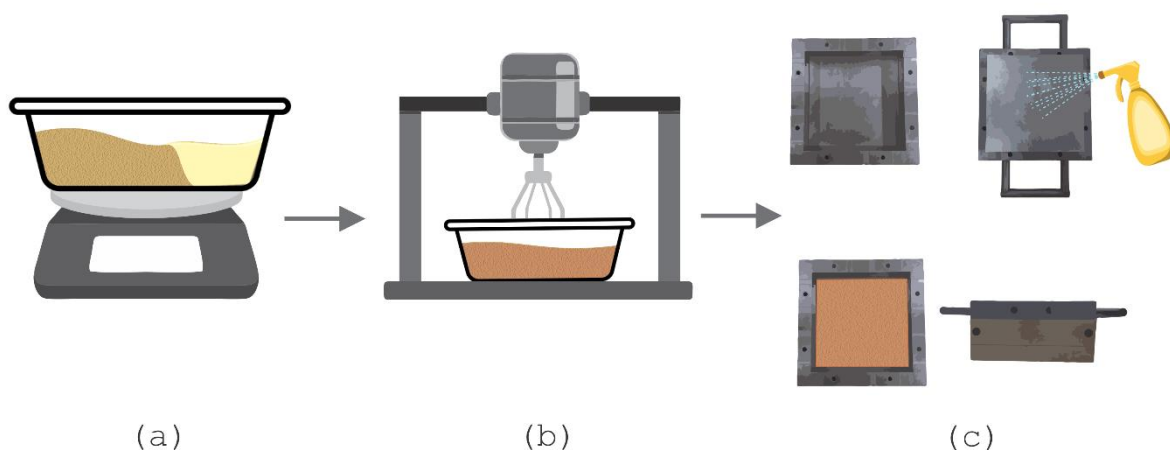


Figura 3 – Representação esquemática (a) pesagem, (b) misturador portátil, (c) aplicação de desmoldante e deposição da mistura no molde.

Fonte: próprio autor

A prensagem ocorreu em duas etapas: primeiro, uma força inicial de 8 a 14 toneladas foi aplicada à temperatura de 150°C, com repetição do procedimento até a remoção completa do ar. Em seguida, uma força final de 20 toneladas foi aplicada à mesma temperatura de 150°C por 5 minutos para consolidar o material e garantir a adequada compactação das placas. As placas foram cuidadosamente removidas do molde para posterior análise.

Os corpos de prova foram confeccionados em ordem aleatória. As placas foram cortadas com uma serra circular de bancada no Laboratório de Usinagem da Madeira (Marcenaria), do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, em Jerônimo Monteiro, Brasil. A aleatoriedade na sequência de confecção foi adotada para minimizar a influência de fatores externos e garantir resultados mais precisos.

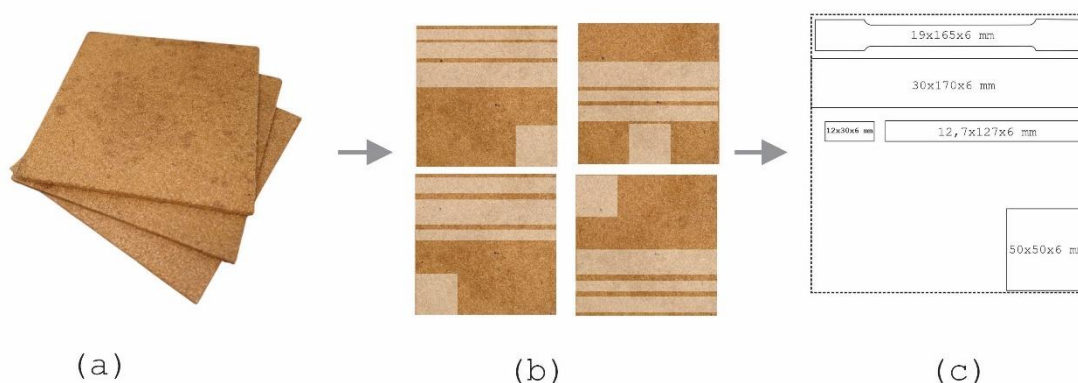


Figura 4 – Representação esquemática (a) placas prontas, (b) posições aleatórias de corte, (c) representação dos corpos de provas na placa

Fonte: próprio autor

2.2. Caracterização Química e Estruturais

Para a realização dos ensaios (DRX, TG/TGA, RMN e FTIR), os corpos de prova utilizados nos testes de tração foram moídos em um moinho de facas tipo Willy, da marca Solab. Esse processo foi realizado no Laboratório de Operações Unitárias do Departamento de Engenharia de Alimentos, em Alegre, ES. Os ensaios de difração de raios X (DRX), termogravimetria (TG/TGA) e ressonância magnética nuclear (RMN) foram conduzidos no Laboratório de Materiais Carbonosos e Cerâmicos do Departamento de Física, localizado em Vitória, ES. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada no Laboratório de Biomateriais do Departamento de Ciências Florestais, em Jerônimo Monteiro, ES. Já a análise de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi conduzida no Laboratório Multiusuário de Instrumentação do LabPetro, no departamento de Química, em Vitória, ES.

2.2.1. Análise termogravimétrica (TG/DTG)

Foram analisadas amostras dos compósitos com maior concentração de resíduos de *Eucalyptus* sp. (70% de RE e 30% de PVA) e menor concentração de resíduos (40% de RE e 60% de PVA), ambas com granulometria de 35 mesh, além das amostras de *Eucalyptus* sp. puro e PVA, com o objetivo de avaliar a estabilidade térmica dos compósitos e identificar as etapas de decomposição térmica. A análise termogravimétrica foi realizada utilizando o equipamento DTG-60H da Shimadzu. As

curvas termogravimétricas foram registradas no intervalo de 10°C a 800°C, com uma taxa de aquecimento constante de 10°C/min, sob fluxo de nitrogênio a 50 ml/min. Após atingir 800°C, as amostras foram expostas a uma atmosfera de oxigênio, também com vazão de 50 ml/min, para garantir a combustão completa do material nessa temperatura. Para cada ensaio foram utilizadas aproximadamente 6 a 15 mg de material, depositadas em cápsulas de alumina abertas.

As análises termogravimétricas (TGA) foram realizadas em amostras pulverizadas (pó fino), obtidas a partir das diferentes concentrações dos compósitos de maior (70% RE e 30% PVA) e menor concentração (40% RE e 60% PVA).

2.2.2. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) das amostras foram obtidos utilizando um espectrofotômetro de infravermelho da Agilent Technologies, modelo Cary 630 FTIR. Foram analisadas as amostras de *Eucalyptus* sp. puro, bem como os tratamentos com 70% de RE e 30% de PVA, 60% de RE e 40% de PVA e 40% de RE e 60% de PVA, utilizando a mistura respectiva de cada tratamento com granulometria 35 mesh, após trituração. O método empregado foi o ATR (Reflectância Total Atenuada), com 16 varreduras (scans) e resolução de 4 cm⁻¹.

2.2.3. Difração de raios-x (DRX)

As análises de Difração de Raios-X (DRX) dos compósitos plástico-madeira foram realizadas no modo de difração em pó, utilizando um porta amostras de vidro. O equipamento utilizado foi o difratômetro Shimadzu XRD-6000, com radiação Cu-K α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). As medidas foram obtidas por meio de uma varredura no intervalo de 5° a 60° no ângulo de difração (2θ), com passos de 0,02° e velocidade de varredura de 2°/min. O equipamento operou a 40 kV de voltagem e 30 mA de corrente. As amostras analisadas incluíram resíduos puros de *Eucalyptus* sp., além dos tratamentos com maior concentração de resíduos de eucalipto (70% de RE e 30% de PVA) e menor concentração de resíduos (40% de RE e 60% de PVA), com o objetivo de analisar os picos característicos, identificar o grau de cristalinidade e amorfismo do material, e avaliar alterações nos picos em função da interação entre os resíduos de *Eucalyptus* sp. e a matriz polimérica de PVA.

2.2.4. Ressonância magnética nuclear (RMN)

Os espectros de RMN foram obtidos utilizando um espectrômetro Varian/Agilent de 400 MHz com campo magnético de 9,4 T (frequência de 100,52 MHz para ^{13}C (carbono-13)). Amostras foram analisadas com rotores de zircônia de 4 mm a temperatura ambiente, utilizando a técnica CP/MAS (Cross Polarization/Magic Angle Spinning) para ^{13}C , com desacoplamento de alta potência (SPINAL) nos núcleos de ^1H . A frequência de MAS foi de 10 kHz, e o tempo de repetição foi de 5 s com um pulso $\pi/2$ de 3,6 μs nos núcleos de ^1H . O tempo de aquisição foi de 20,48 m/s com uma janela espectral de 50 kHz, acumulando 1500 transientes. Os espectros de RMN de ^{13}C CP/MAS foram obtidos para cinco amostras: RE e os Tratamentos 1, 3, 4 e 6 com um tempo de relaxação (d_1) de 100 s e um pulso $\pi/2$ de 4,3 μs . Todos os espectros foram processados no ACD/NMR Processor Academic Edition, utilizando apodização exponencial e deconvolução com curvas Gaussianas e Lorentzianas.

2.2.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

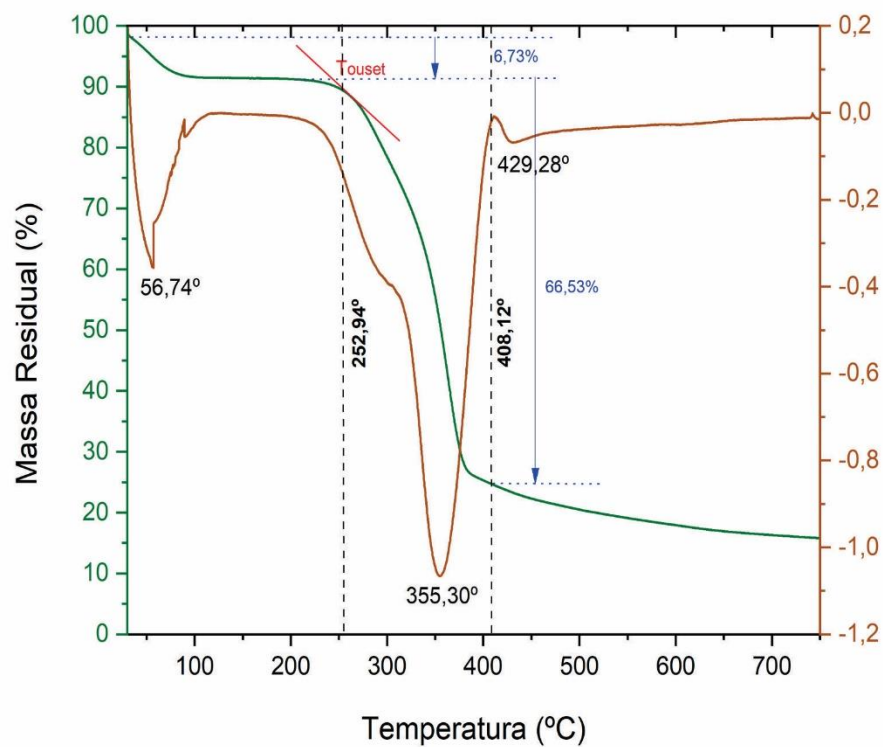
Para a caracterização morfológica dos compósitos por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram analisadas as superfícies dos corpos de prova submetidos ao teste de tração. O objetivo foi observar a superfície de fratura e analisar a adesão entre o reforço e a matriz. As amostras, cortadas em tamanhos de aproximadamente 1 cm, foram revestidas por ouro utilizando o equipamento Quorum, modelo 150R ES PLUS. As imagens foram obtidas com aumentos de 100 e 1000 vezes para verificar aspectos relacionados à compactação do reforço e da matriz polimérica dos compósitos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

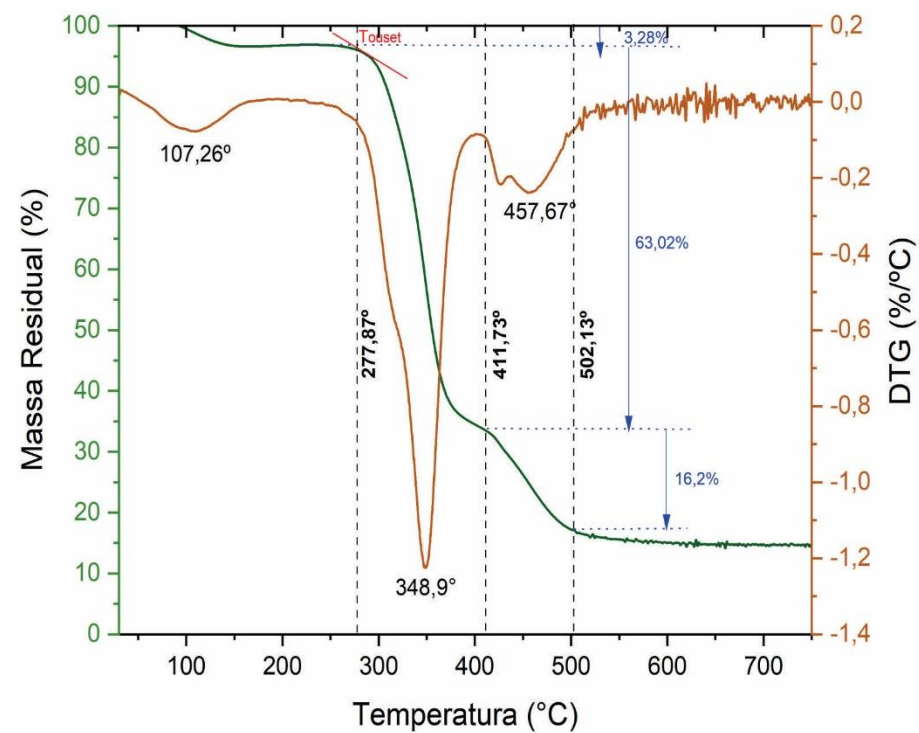
3.1. Análise termogravimétrica (TG/DTA)

As Figuras 5 e 6 ilustram o comportamento termogravimétrico dos tratamentos, apenas resíduos de *Eucalyptus* sp. (RE), PVA e dos tratamentos T1 (70% RE e 30%) e T3 (40% RE e 60% PVA). A presença de múltiplos picos no gráfico DTG indica a

ocorrência de diferentes processos de decomposição, cada um associado a um componente específico da biomassa do eucalipto, como umidade (aproximadamente 50–100°C) (LOPESI et al., 2023), extrativos (100–200°C) (CHEN et al., 2021), hemicelulose (200–280°C), celulose (280–350°C) e lignina (350–520°C), nessa ordem (NURAZZI, et al 2021).



(a)



(b)

Figura 5 – Curvas TG e DTG: (a) resíduo de eucalipto puro; (b) da matriz polimérica (PVA).

Fonte: próprio autor

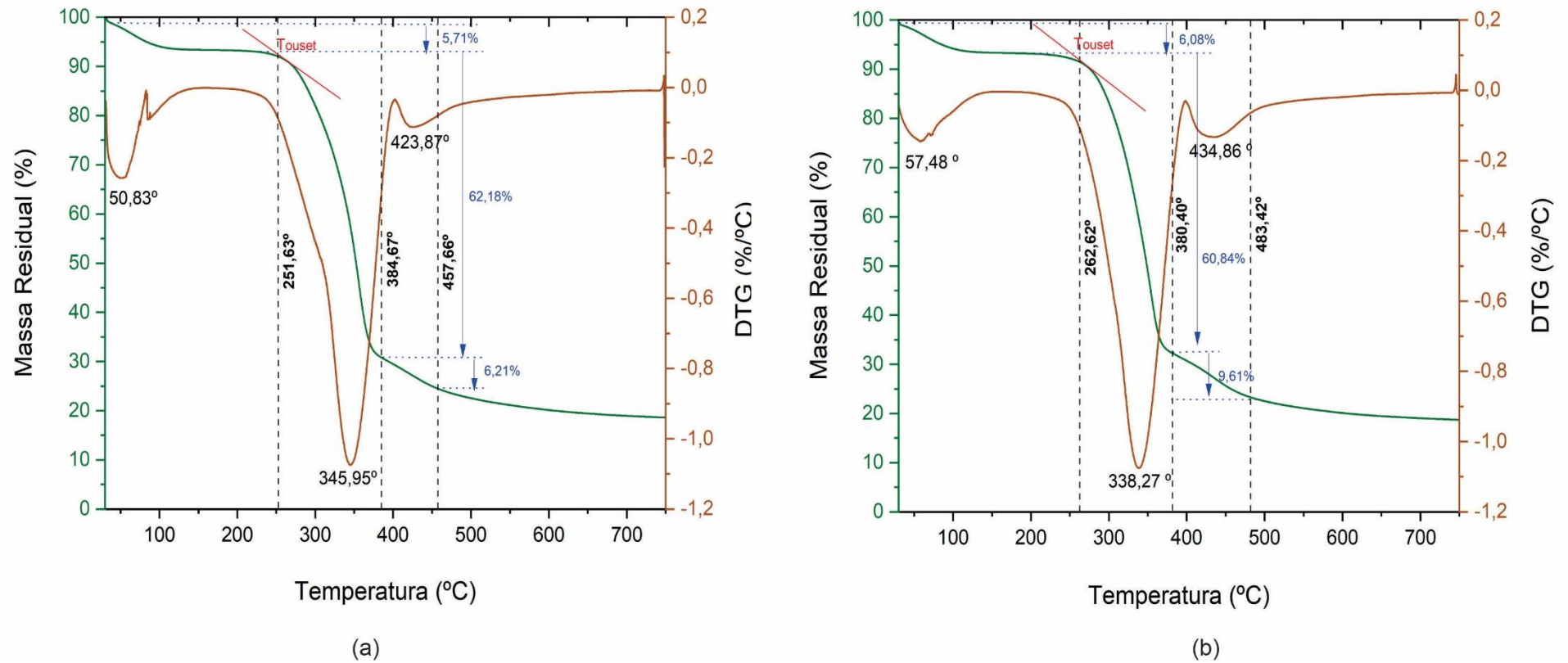


Figura 6 – Curvas TG e DTG: (a) do compósito de 70% RE e 30% PVA; (b) do compósito de 40% RE e 60% PVA.

Fonte: próprio autor

Observa-se que a perda de massa para todos os compósitos e RE iniciou próxima à 30°C (Figura 5 e 6), indicada pelo pico nas curvas DTG aproximadamente até 130 °C, que é atribuída a evaporação de água e moléculas orgânicas voláteis (SHARIFF, A. et al. 2016). O segundo estágio de degradação do RE, ocorre em torno de 243,3 °C e 355,30 °C, com uma perda de massa associada a 66,53% da amostra. Essa faixa de temperatura refere-se à degradação térmica da hemicelulose e da celulose (RAJU et al, 2023). Após 400° C, a massa residual em temperaturas mais altas pode indicar a formação de resíduos carbonizados, a presença de materiais inorgânicos, como as cinzas, e também a lignina, que é um componente da parede celular da madeira e que possui alta resistência à decomposição térmica (SORATTO, et al 2020; DE CARVALHO et al, 2021).

O comportamento térmico do PVA revelou três principais etapas de perda de massa: uma perda inicial de 3,28% entre 47 °C e 107,26 °C, atribuída à perda de água absorvida e ligada; uma segunda etapa de 63,02%, com início em 270,32 °C e pico em 348,9 °C, associada à degradação das cadeias poliméricas; e uma terceira etapa de 16,21%, atingindo o pico de decomposição em 457,67 °C, em conformidade (TSIOPTIAS et al., 2023). Em comparação, Feng et al. (2024) identificaram quatro estágios: a primeira perda de 5,8% a 100 °C, relacionada à remoção de água residual; a segunda de 62%, entre 230 °C e 270 °C, atribuída à desidratação de grupos hidroxila e degradação de ligações (C-OH); e perdas de 20,1% e 12,1% a 400 °C e 520 °C, respectivamente, devido à quebra de ligações (C-C). As diferenças nos valores e estágios finais de degradação decorrem de variações na composição, pureza do PVA e nas condições experimentais, como taxa de aquecimento e atmosfera. Apesar disso, ambos os estudos identificam múltiplos estágios característicos no comportamento térmico do PVA.

A decomposição inicial do compósito com 70% de resíduos de *Eucalyptus* sp. (RE) e 30% de PVA ocorre a uma temperatura de 251,63 °C, semelhante à do resíduo puro. Já o compósito com maior concentração de PVA (60%) apresenta uma decomposição inicial a 262,62 °C, uma temperatura mais alta em comparação ao compósito com 30% de PVA. Esse comportamento confirma que o PVA influencia o processo de decomposição térmica nas etapas iniciais.

A faixa de decomposição principal dos compósitos também é diretamente afetada pela concentração de PVA. O compósito com 70% RE e 30% PVA apresenta um intervalo de 133,04 °C, enquanto o compósito com 40% RE e 60% PVA possui uma faixa menor, de 117,78 °C. Esses resultados demonstram que o PVA aumenta a estabilidade térmica na etapa de decomposição principal. No entanto, compósitos com maior concentração de resíduos de eucalipto apresentam uma faixa de decomposição mais ampla devido à maior quantidade de resíduos presentes no material.

Estudos recentes mostram que um maior teor de matriz polimérica pode resultar em uma menor massa residual após a degradação térmica, devido à menor estabilidade térmica dos polímeros em comparação à lignina (NETO, et al 2021; BARRA, et al 2023).

A degradação térmica da lignina e da celulose geralmente ocorre na faixa de temperatura de 300–450 °C (ASIM et al., 2020). A lignina, por ser um polímero aromático com uma estrutura altamente estável, retém uma maior quantidade de massa residual em temperaturas elevadas, frequentemente se transformando em biocarvão. Já muitos polímeros sintéticos se decompõem em temperaturas mais baixas, levando a uma maior perda de massa durante a análise termogravimétrica (KUMAR et al., 2022; PAPPA et al., 2024).

O resíduo de *Eucalyptus* sp. (RE) puro apresenta uma perda de massa entre 252,94 °C e 408,12 °C, com redução aproximada de 66,53%, atribuída à decomposição de componentes orgânicos como celulose, hemicelulose e lignina. De acordo com Fialho et al. (2019), na faixa de 300 °C a 450 °C ocorre a maior perda de massa da madeira, associada à degradação predominante da celulose, que corresponde a cerca de 48% da composição da madeira. A degradação das hemiceluloses ocorre principalmente entre 200 °C e 300 °C, enquanto a lignina, devido à sua estrutura com ligações C–C e C=C, apresenta um comportamento térmico diferenciado, iniciando a degradação em torno de 160 °C e se estendendo acima de 450 °C. Esse perfil reflete a menor

estabilidade térmica da celulose e hemicelulose em comparação com a lignina, que é mais resistente e contribui para a formação de carbono residual.

Nos compósitos, a presença de PVA altera esse comportamento. No compósito com 70% de RE e 30% de PVA, a perda de massa ocorre de forma semelhante, mas em temperaturas ligeiramente mais baixas, entre 251,8°C e 384,67°C, com uma redução de 62,18%. Já o compósito com 40% de RE e 60% de PVA exibe uma perda de massa de 60,84%, ocorrendo entre 262,62 °C e 380,40°C. Essa menor perda de massa, juntamente com o deslocamento das temperaturas de decomposição para faixas mais baixas, indica que a maior concentração de PVA compromete a estabilidade térmica dos compósitos, uma vez que a estrutura menos organizada do PVA reduz a resistência térmica (BARRA et al., 2023). Além disso, o PVA acelera a degradação térmica dos resíduos de eucalipto, diminuindo a temperatura de decomposição inicial e aumentando a perda de massa devido à interação com a matriz polimérica (MORENO et al., 2020).

3.2. Espectroscopia no infravermelho (FTIR)

Os espectros de FTIR para resíduo de eucalipto e para as diferentes concentrações dos tratamentos (70% RE e 30% PVA, 60% RE e 40% PVA, 40% RE e 60% PVA) estão dispostos na Figura 7.

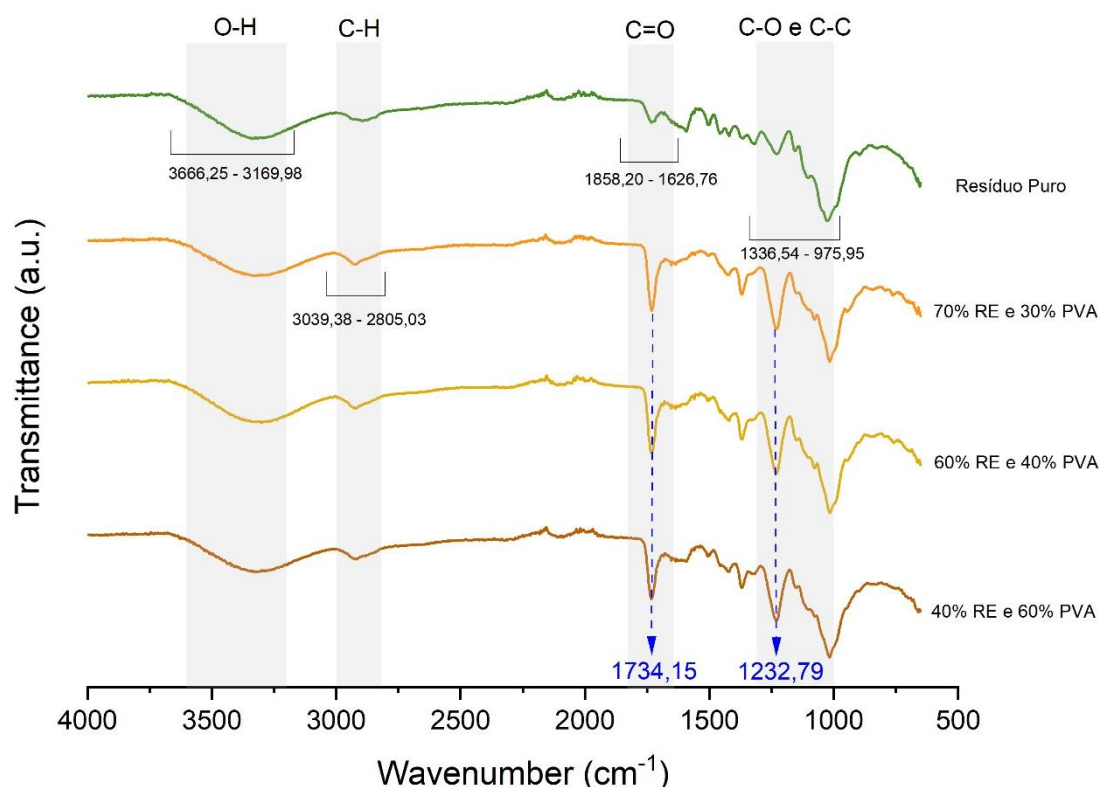


Figura 7 – Espectros no infravermelho das amostras RE, 70% RE e 30% PVA, 60% RE e 40% PVA e 40% RE e 60% PVA.

Fonte: próprio autor

No espectro FTIR, as bandas características dos grupos funcionais apresentam sobreposição parcial entre os tratamentos, com diferenças na intensidade e deslocamento. O pico de O-H ($3666,25-3169,98\text{ cm}^{-1}$) é mais intenso no resíduo puro e diminui nos compósitos, refletindo a redução de grupos hidroxila devido à interação com o PVA. A região de C-H ($3039,38-2805,03\text{ cm}^{-1}$) mantém picos similares, mas com alterações na intensidade conforme aumenta o teor de PVA. O pico de C=O ($1858,20-1626,76\text{ cm}^{-1}$) apresenta deslocamentos e redução de intensidade, indicando modificações estruturais. Na região de C-O e C-C ($1336,54-975,95\text{ cm}^{-1}$), há sobreposição evidente, mas as intensidades variam conforme o aumento do PVA. O pico observado na faixa de $3666,25-2805,03\text{ cm}^{-1}$ é característico de bandas largas correspondentes às vibrações de estiramento O-H e C-H, associadas à presença de celulose, hemiceluloses e lignina (XU et al., 2021). A presença de lignina é evidenciada pelos picos de absorção na faixa de $1500\text{ a }1600\text{ cm}^{-1}$. O sinal próximo a 1700 cm^{-1} é atribuído às vibrações de estiramento C=O, relacionadas aos grupos carbonila nas hemiceluloses ou às estruturas conjugadas na lignina. Na região entre

1000 e 1200 cm^{-1} , as bandas de absorção associadas às vibrações de estiramento C-O-C e C-OH confirmam as estruturas características de carboidratos, indicando a presença de celulose e hemicelulose, que são essenciais para a resistência mecânica e a flexibilidade da madeira (VELOSO JR et al., 2024).

Com o aumento da concentração de PVA, a intensidade das bandas características diminui, o que sugere a formação de ligações de hidrogênio entre o PVA e os grupos hidroxila do resíduo. Esse fenômeno é corroborado por Tsiptsias et al. (2023), que observam que a redução dos picos em 3200 cm^{-1} (positivo) e 3600 cm^{-1} (negativo) sugere uma diminuição dos grupos OH livres, indicando maior número de ligações de hidrogênio. Tais interações entre os grupos hidroxila do PVA e do resíduo influenciam diretamente a estrutura e as propriedades do material compósito. Vale destacar que essas ligações de hidrogênio desempenham papel fundamental nas propriedades físico-químicas da celulose (IHSANI et al., 2025).

Na região de alongamento C-H (3000–2800 cm^{-1}), observa-se um aumento na intensidade das vibrações alifáticas C-H com o aumento da concentração de PVA, conforme relatado por Aziz et al. (2021). Isso indica a presença de grupos metileno ($-\text{CH}_2-$) do PVA na matriz do compósito, evidenciando a contribuição do polímero para a estrutura do material ao melhorar a homogeneização e a interação entre as fases do compósito.

A presença de um pico em 1734,15 cm^{-1} , correspondente ao alongamento C=O, é atribuída a grupos éster ou ácido carboxílico presentes na hemicelulose e na matriz do PVA (ALVAREZ et al., 2020). A intensificação desse pico à medida que a concentração de PVA aumenta evidencia a maior incorporação dos grupos carbonila do polímero na estrutura do compósito. A identificação desse pico indica a presença de grupos carbonila em amostras provenientes de compostos de celulose modificada (IHSANI et al., 2025).

A origem da perda de massa observada na análise térmica (TG) é explicada pela decomposição térmica das ligações C-H e C-O presentes nos grupos alifáticos e hidroxila ($-\text{OH}$), além da ligação C=O, que são mais suscetíveis à degradação térmica. A presença desses grupos está diretamente ligada à liberação de água e outros voláteis, especialmente em temperaturas mais baixas (200-350 °C) (OTARU et al., 2024). Nos compósitos, a introdução de PVA, com suas ligações C-H e C-O, retarda a perda de massa, deslocando o início da decomposição de cerca de 200 °C para

temperaturas superiores, geralmente entre 300–450 °C, conforme discutido por Alhulaybi et al. (2024).

A região entre 1336,54 e 975,95 cm^{-1} é atribuída às ligações C-O e C-C, que são características da ligação entre polissacarídeos e lignina (COELHO, 2019). Por fim, na região de 1336,54–975,95 cm^{-1} , as bandas referentes ao alongamento C-O e C-C tornam-se mais evidentes com o aumento da concentração de PVA, especialmente em 1232,79 cm^{-1} . Essa região é associada às vibrações de C-O da matriz de PVA e dos componentes de lignina e celulose do eucalipto (KANG et. al, 2023; MANSUR et. al, 2008). Para PVA, os picos de absorção característicos estão localizados em 3458 cm^{-1} (vibração de alongamento O–H) e 1104 cm^{-1} (domínios cristalinos de PVA) (KANG, et al 2023).

A partir dos resultados apresentados, observa-se que as concentrações de RE e PVA nos compósitos provocam mudanças na presença e intensidade dos picos, sugerindo alterações nas propriedades químicas dos materiais. As modificações nos espectros indicam uma possível interação química entre o PVA e o resíduo de *Eucalyptus* sp., promovendo mudanças estruturais.

3.3. Difração de Raio-X (DRX)

A Figura 8 apresenta os difratogramas de raios X do compósito plástico-madeira produzido com as maiores e menores concentrações de resíduo de eucalipto (70% RE e 30% PVA; 40% RE e 60% PVA), bem como dos materiais individuais, resíduos de eucalipto (RE) e PVA. A técnica de difração de raios X foi empregada com o objetivo de avaliar a cristalinidade dos compósitos, verificando se o material apresenta características mais cristalinas ou amorfas, com base nas posições e intensidades dos picos observados nos difratogramas.

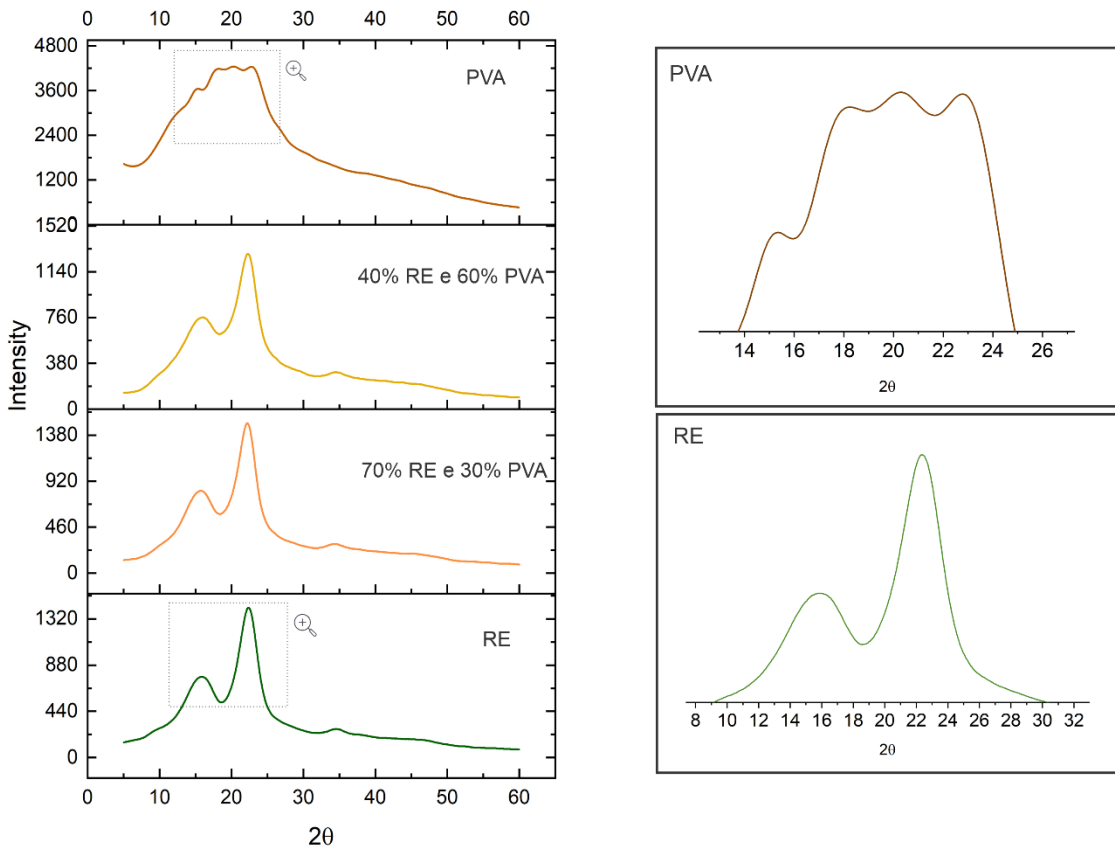


Figura 8 – Espectros de DRX das amostras RE, 40% RE e 60% PVA, 70% RE e 30% PVA e PVA.

Fonte: próprio autor

Como esperado, os resultados dos difratogramas indicam a presença de picos característicos, especialmente associados à celulose, tanto nas amostras de compósitos quanto nos resíduos de eucalipto. Os picos em $15,79^\circ$ e $22,34^\circ$ estão dentro do padrão de difração, indicativos da presença da celulose conforme os estudos (VIANA, 2023; SENA et al., 2021).

O PVA apresenta um baixo índice de cristalinidade, o que é esperado, considerando que é um polímero predominantemente de estrutura amorfo (PINTO et. al, 2023). Os perfis de difração do PVA apresentam os picos nas posições 2θ em $15,32^\circ$, $18,19^\circ$, $20,3^\circ$ e $22,88^\circ$, esses picos são próximos aos considerados pela literatura como sendo os picos característicos da fase cristalina do PVA corroborando com (BATISTA, 2023; SILVA JÚNIOR, 2021; PING LIU, et al. 2019).

Nos compósitos, observa-se que a concentração de PVA influencia diretamente o padrão de difração. O compósito com 70% de RE e 30% de PVA apresenta picos difratométricos mais próximos aos do resíduo de eucalipto puro, mantendo uma maior cristalinidade devido à predominância do RE. A introdução de PVA, porém, promove

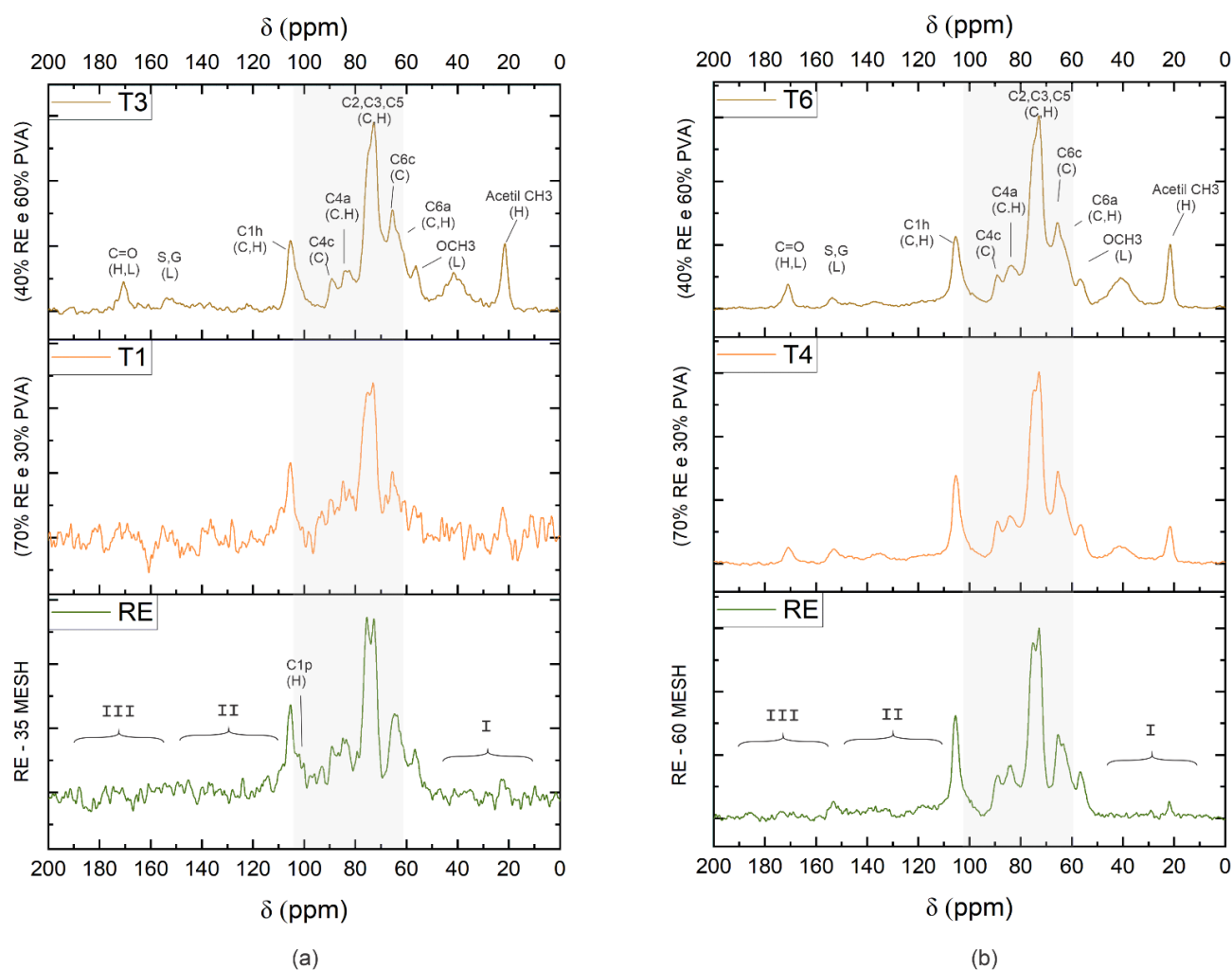
uma leve redução na intensidade dos picos, indicando a presença de uma fase amorfa. Já no compósito com 40% de RE e 60% de PVA, ocorre uma redução mais significativa na intensidade e na definição dos picos, confirmando uma redução na cristalinidade em função do aumento da fração amorfa proporcionada pelo PVA.

Os resultados demonstram que a cristalinidade do compósito é influenciada pela proporção de seus constituintes: o aumento da concentração de PVA promove a redução da cristalinidade global, enquanto o resíduo de *Eucalyptus* (RE) atua na manutenção das regiões cristalinas. As posições dos picos próximas a 16° e 22° (2θ) confirmam essa tendência, essas posições são características de estruturas cristalinas típicas da celulose, como observado por Bouramdane et al. (2022) que associam esses picos a presença de planos cristalográficos da celulose I e a interação entre lignina e celulose.

3.4. Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

Os espectros de RMN CP/MAS de ^{13}C das amostras de Resíduo de *Eucalyptus* sp. (RE) de 35 e 60 mesh e dos tratamentos com maior concentração de resíduo (T1 e T4 – 70% RE e 30% PVA) e menor concentração de resíduo (T3 e T6 – 40% RE e 60% PVA) estão apresentados nas Figuras 9. Os dados foram definidos segundo as regiões espectrais descritas por Fortunato (2022).

A escolha dos tratamentos com maior (T1 e T4) e menor (T3 e T6) concentração de resíduo foi realizada para avaliar o impacto da proporção de PVA na organização estrutural do material.



Legenda: (C) celulose, (H) hemicelulose, (L) lignina, (S) siringil, (G) guaiacil, (p) pentose, (h) hexose, (c) cristalino, (a) amorfo. I - região alifática; II - região olefinicas e aromáticas; III - região carbonílicas e acílicas.

Figura 9 – Espectros de RMN CP/MAS de ^{13}C obtidos para amostras padrões de granulometria de (a) 35 mesh e (b) 60 mesh.

Fonte: próprio autor

Os espectros de RMN CP/MAS ^{13}C obtidos para os compósitos plástico-madeira e para os resíduos de *Eucalyptus* sp. evidenciam alterações estruturais decorrentes da incorporação de PVA em diferentes concentrações e granulometrias. As análises mostram que os picos característicos da celulose aparecem predominantemente entre 60 e 110 ppm, sendo atribuídos às regiões cristalinas e amorfas da estrutura celulósica, em conformidade com Phyo et al. (2019). Nos resíduos puros (RE - 35 mesh e RE - 60 mesh), as regiões cristalinas da celulose apresentam picos bem definidos e maior intensidade nas faixas de 84-89 ppm (C4c) e 64-66 ppm (C6c), confirmando a elevada organização estrutural da celulose nesses materiais. Esses resultados estão alinhados com os picos descritos por Foston et al. (2011), que determinaram a cristalinidade por meio da integração de dois picos da região de

carbono cristalino C4 (δ 85–92 ppm) sobre a integral de toda a região C4 (δ 80–92 ppm)

Com o aumento da concentração de PVA nos tratamentos T3 e T6 (40% RE e 60% PVA), uma redução na intensidade dos picos cristalinos, como evidenciado pela diminuição das regiões C4c (84-89 ppm) e C6c (64-66 ppm). Isso ocorre devido à natureza amorfa do PVA (PINTO et al. 2023), que interfere diretamente na organização das cadeias celulósicas. A interação entre a matriz polimérica (PVA) e a celulose diminui a cristalinidade, resultando em uma estrutura mais desordenada no compósito. Além disso, observa-se um aumento nas intensidades dos picos associados às regiões amorfas da celulose (C4a e C6a), confirmando que a presença do PVA favoreceu a desordem estrutural na celulose.

Nos resíduos de maior granulometria (RE-35 MESH), os picos cristalinos são mais definidos, principalmente nas faixas (84-89 ppm) e (64-66 ppm), indicando uma maior exposição das regiões cristalinas devido à maior área superficial específica das partículas maiores. Isso ocorre em materiais com partículas maiores, as cadeias celulósicas cristalinas são mais acessíveis, permitindo uma interação mais eficaz com a matriz polimérica, como observado por Santos et al. (2013), que demonstraram que partículas maiores de celulose favorecem a dispersão do ácido polilático (PLA), melhorando as propriedades mecânicas dos compósitos.

Por outro lado, nos resíduos com menor granulometria (RE-60 MESH), os picos cristalinos são menos intensos nessas mesmas faixas, o que é explicado pela menor área superficial e pela maior dificuldade de interação entre as partículas e o PVA. Isso contribui para a diminuição das propriedades mecânicas. O mesmo é indicado por Delviawan et al. (2019), que afirmam que uma quantidade excessiva de partículas pequenas reduz as propriedades mecânicas do compósito plástico-madeira.

Nos tratamentos com maior teor de PVA, como T3 e T6, as diferenças entre as granulometrias se tornam menos evidentes. A presença de PVA, portanto, contribui para uma uniformização estrutural, minimizando as diferenças entre as partículas de resíduos com diferentes tamanhos. Nos tratamentos com menor teor de PVA, T4 apresenta picos mais definidos e nítidos do que T1.

Além disso, os sinais característicos de outros componentes lignocelulósicos, como hemicelulose e lignina, permanecem presentes, evidenciando a preservação das suas estruturas. Sinais de hemicelulose, como C1h e C4a, e de lignina, como os picos de guaiacil e siringil (S, G), estão visíveis entre 50 e 160 ppm, confirmando que a adição

de PVA não degrada essas substâncias. Resultados semelhantes foram observados por Barra et al. (2023), que, por meio de espectroscopia de RMN, identificaram a preservação da estrutura da lignina mesmo após tratamentos enzimáticos, com picos de guaiacil (G) e siringil (S) visíveis entre 110 e 160 ppm, evidenciando que a modificação enzimática não leva à degradação significativa dos componentes lignocelulósicos

3.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As Figuras 10 e 11 apresentam micrografias obtidas a partir de amostras ensaiadas à tração. Nelas, é possível identificar as interações entre os resíduos de eucalipto e a matriz polimérica em suas diferentes concentrações e granulometrias. Os Tratamentos 1 a 3 estão representados na Figura 10, enquanto os Tratamentos 4 a 6, na Figura 11.

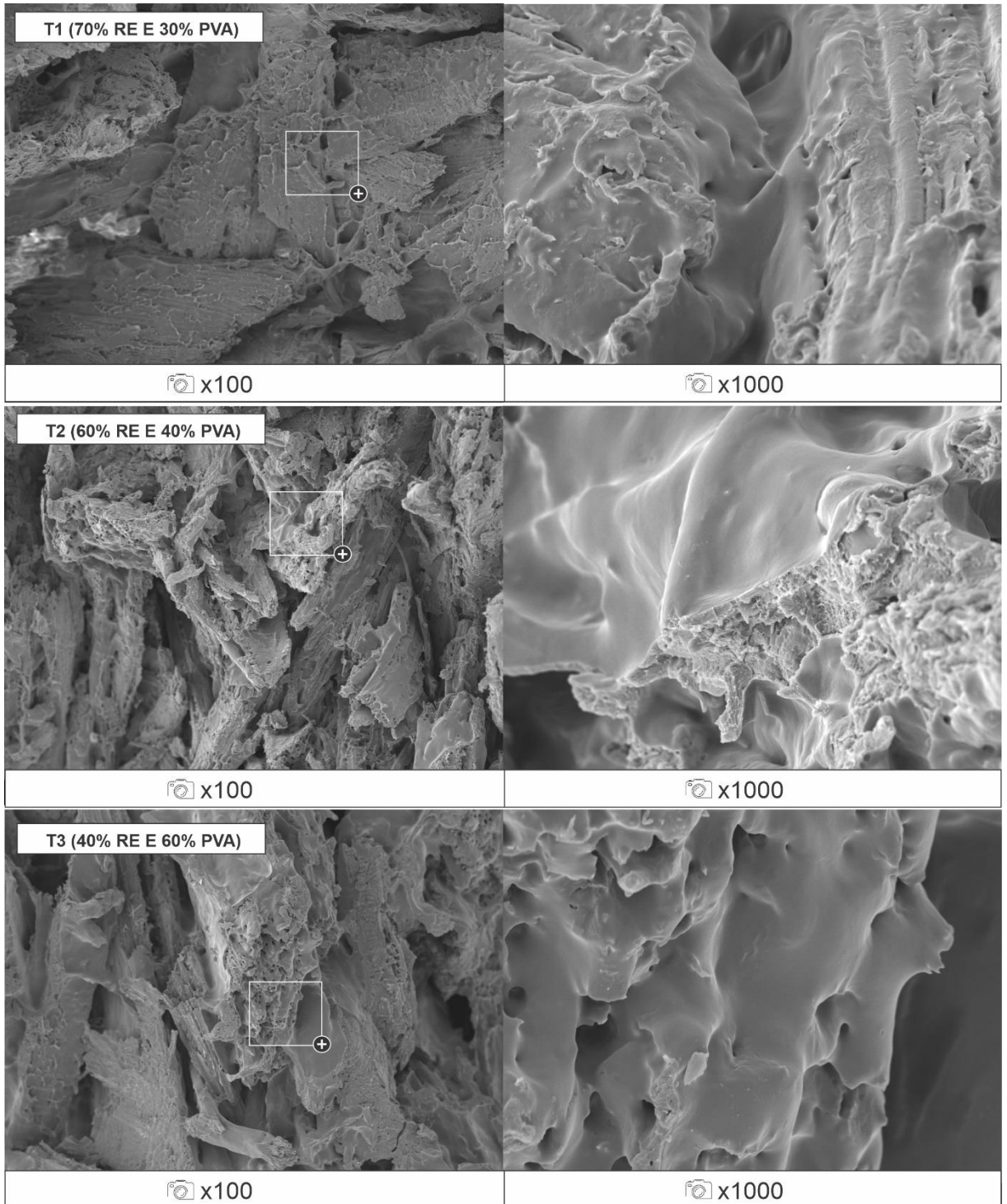


Figura 10 – Micrografias dos compósitos T1, T2 e T3 (35 mesh).

Fonte: próprio autor

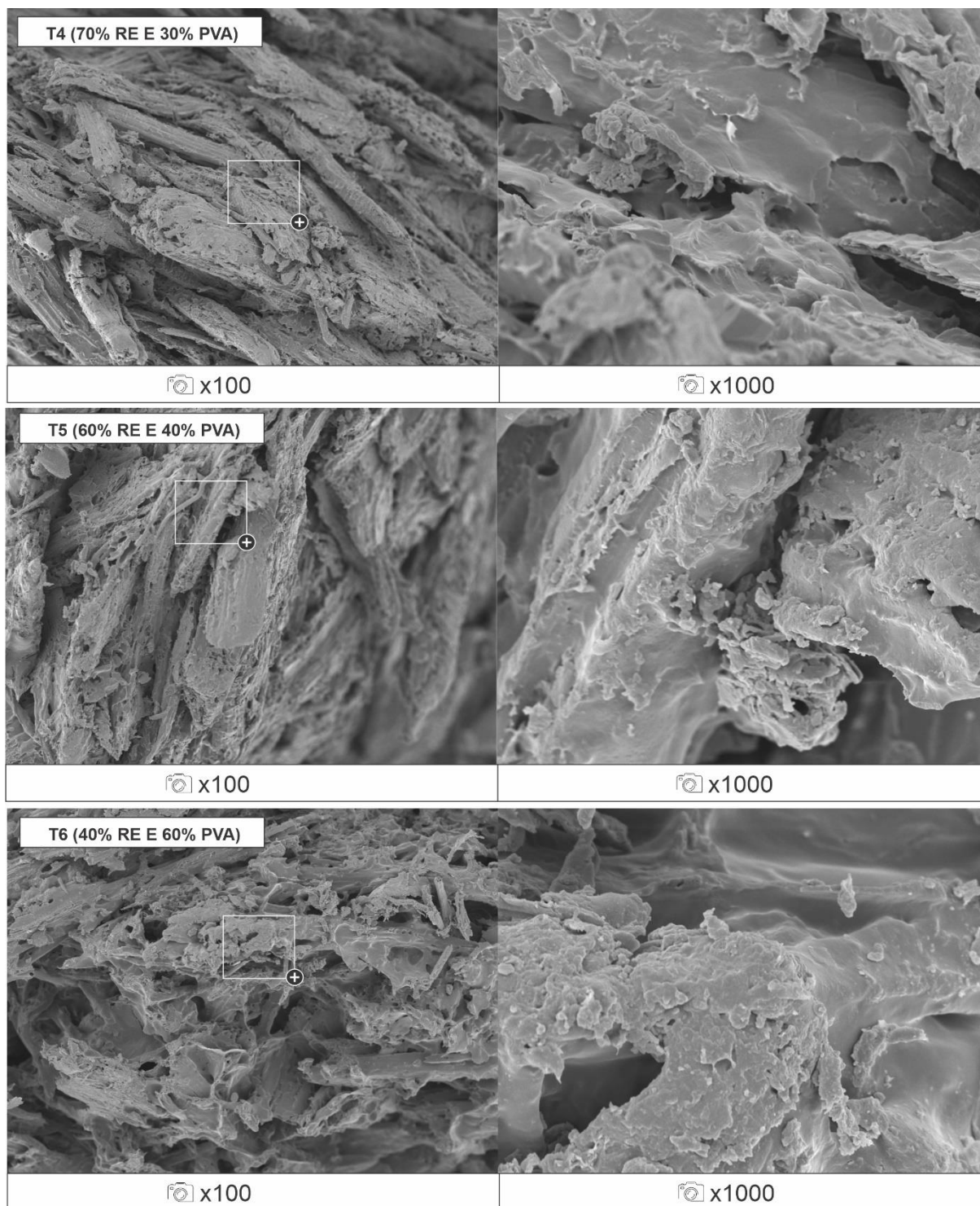


Figura 11 – Micrografias dos compostos T4, T5 e T6 (60 mesh).

Fonte: próprio autor

As micrografias obtidas por MEV mostram a influência da concentração de PVA na adesão entre os resíduos de eucalipto (RE) e a matriz polimérica em diferentes granulometrias. Para a granulometria de 35 mesh, no Tratamento T1 (70% RE e 30% PVA), observa-se uma interface com falhas e espaços vazios, indicando fraca adesão devido à menor quantidade de PVA. No Tratamento T2 (60% RE e 40% PVA), a interface melhora, com maior cobertura dos resíduos pela matriz, embora ainda

apresente descontinuidades. No Tratamento T3 (40% RE e 60% PVA), a interface se torna mais coesa e homogênea, com o PVA envolvendo completamente os resíduos e reduzindo as falhas interfaciais. Esse comportamento está em consonância com a pesquisa de Hsia (2024), que destaca que, em compósitos com baixa adesão entre a matriz e o reforço, as diferenças nos módulos de elasticidade podem gerar tensões adicionais nas regiões de fraca adesão, resultando em danos localizados. Portanto, a melhoria da adesão observada nos tratamentos com maior concentração de PVA é fundamental para reduzir essas tensões, resultando em uma interface mais coesa e na melhoria das propriedades do compósito.

Para a granulometria de 60 mesh, observa-se um comportamento semelhante. No Tratamento T4 (70% RE e 30% PVA), as micrografias evidenciam falhas interfaciais, confirmando a fraca adesão entre os componentes. No Tratamento T5 (60% RE e 40% PVA), a interface apresenta melhor cobertura dos resíduos e maior uniformidade, mas ainda com pequenas descontinuidades visíveis. No Tratamento T6 (40% RE e 60% PVA), a interface se torna mais coesa e compacta, com o PVA envolvendo completamente os resíduos e minimizando. Esse comportamento pode ser explicado pelos resultados de Alves et al. (2021), que observaram melhor adesão entre a matriz e o reforço para partículas menores e aglomeração para partículas maiores, devido à utilização da prensa, que não promoveu boa dispersão das fibras, além da ausência de compatibilizante, o que afetou a dispersão do material celulósico.

Rahman et al. (2018), ao estudar a produção de compósitos plástico-madeira com partículas pequenas (0,5 – 1,0 mm) e grandes (1,01 – 2,0 mm) utilizando matriz polimérica PET, relataram que compósitos com partículas maiores apresentaram melhores propriedades físicas e mecânicas. Portanto, embora os compósitos com granulometria menor (60 mesh) apresentem maior adesão, o desempenho final também depende de como a granulometria e a adesão se combinam, o que pode influenciar diretamente as propriedades mecânicas e estruturais do compósito.

4 CONCLUSÃO

Os resultados dos ensaios realizados evidenciaram o impacto das concentrações de resíduos de *Eucalyptus* sp. (RE) e de PVA nas propriedades térmicas e químicas dos compósitos. A análise termogravimétrica (TGA) demonstrou que compósitos com 70% RE e 30% PVA apresentam maior faixa de decomposição térmica (133,04 °C), enquanto compósitos com 40% RE e 60% PVA exibem menor estabilidade térmica (faixa de 117,78 °C), com temperaturas variando entre 262,62 °C e 380,40 °C. O PVA reduz a estabilidade térmica dos compósitos, acelerando a degradação dos resíduos de eucalipto e aumentando a perda de massa.

Os difratogramas de raios-X revelaram que a cristalinidade dos compósitos aumenta com o teor de RE, enquanto o RMN CP/MAS ¹³C confirmou que o PVA favorece a desordem estrutural da celulose, aumentando as intensidades dos picos amorfos (C4a e C6a). O FTIR indicou a formação de ligações de hidrogênio entre o PVA e os grupos hidroxila do RE, alterando as ligações químicas e a presença dos picos característicos. A caracterização morfológica por MEV mostrou que a adesão entre os componentes melhora com o aumento do PVA.

Esses resultados ampliam a compreensão das interações entre matriz e reforço nos compósitos plástico-madeira, permitindo ajustes nas propriedades conforme a proporção dos componentes. Assim, os compósitos desenvolvidos apresentam potencial para aplicações industriais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. **Estudo Setorial 2022: ano base 2021**. 2022. p. 54-172.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004: Resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

ALMEIDA Jr. et al. **Contribution of ecodesign to the furniture sector: analysis of residues from the furniture pole of Ubá**. *Mediação*. N 09.2019, 2019. Disponível em: <https://revista.uemg.br/index.php/mediacao/article/view/4334>.

ALVAREZ, J. G.; BERROCAL, A.; MANTANIS, G. I.; MOYA, R.; ARAYA, F. **Acetylation of tropical hardwood species from forest plantations in Costa Rica: an FTIR spectroscopic analysis**. *Journal of Wood Science*, v. 66, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01898-9>

ASIM, M.; UDDIN, G. M.; JAMSHAD, H.; RAZA, A.; TAHIR, A. R.; HUSSAIN, U. et al. **Comparative experimental investigation of natural fibers reinforcement light weight concrete as thermally efficient building materials**. *J Build Eng*, v. 31, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101411>

AZIZ, T.; ULLAH, A.; FAN, H.; JAMIL, M.; KHAN, F.; ULLAH, R.; IQBAL, M.; ALI, A.; ULLAH, B. **Recent progress in silane coupling agent with its emerging applications**. *J Polym Environ*, v. 29, n. 11, p. 3427–3443, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02142-1>

BARRA, G.; GUADAGNO, L.; RAIMONDO, M.; SANTONICOLA, M. G.; TOTO, E.; CIPRIOTI, S. V. **A Comprehensive Review on the Thermal Stability Assessment**

of Polymers and Composites for Aeronautics and Space Applications. 2023.

DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15183786>

BATISTA, Carlos Yago Pereira. **Compósitos poliméricos de PVA/PVDF/Li e cerâmico de $\text{Bi}_{0,5}\text{Na}_{0,5}\text{Ba}(\text{TiO}_3)_2$ com alto potencial em aplicações energéticas.** 2023. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2023.

CHEN, W.H.; L, Y. Y.; C, Y. S.; U, A. T.; S, P. L.; O, H. O.; C, J. S.; H, S. H.; C, A. B.; P, A.; P, M. **Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges.** 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100887>

COELHO, K. V. Z.; LIBANO, E. V. D. G.; BASTOS, D. C.; PEREIRA, P. S. C. **Estudo da influência do teor de fibras e de compatibilizante na obtenção de compósitos de polietileno de alta densidade pós-consumo (PEADpc) com fibras de bagaço de cana-de-açúcar (BCA).** Cadernos UniFOA, v. 43, p. 49–61, 2020. DOI: <https://doi.org/10.47385/cadunifoa.v15.n43.3094>

DE CARVALHO, N. R.; DE BARROS, J. L.; DA SILVA, D. A.; NAKASHIMA, G. T.; YAMAJI, F. M. **Caracterização Física E Química Da Biomassa Usada Como Combustível Sólido Em Uma Caldeira.** Quim. Nova, v. 44, n. 1, p. 35-40, 2021.

DELVIAWAN, A.; KOJIMA, Y.; KOBORI, H.; SUZUKI, S.; AOKI, K.; OGOE, S. **The effect of wood particle size distribution on the mechanical properties of wood-plastic composite.** Journal of Wood Science, v. 65, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1846-9>

FENG, Y.; XU, R.; LI, Y.; XHANG, B.; WANG, J.; CHEN, Z.; WANG, L.; WANG, H. **Preparation and property of PVA-based colorful coating composite**

reinforced with silica aerogel particles filled by high-loaded flame retardant. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00396-024-05292-5>

FIALHO, L. F.; CARNEIRO, A. C.; FIGUEIRÓ, C. G.; CARNEIRO, A. P. S.; SURDI, P. G.; VITAL, B. R.; MAGALHÃES, M. A.; PERES, L. C. **Application of thermogravimetric analysis as a pre-selection tool for Eucalyptus spp.** Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v. 14, n. 3, e6363, 2019. DOI: 10.5039/agraria.v14i3a6363

FISPQ. **Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos. EUROCRYL 5300.** 2021. p 1-9.

FORTUNATO, Michelle Ramos Cavalcante. **Caracterização de Biomassas Lignocelulósicas e dos Efeitos do Pré-tratamento em Moinho de Bolas por Ressonância Magnética Nuclear de Sólidos.** 2022. Projeto Final de Curso (Bacharel em Química – Petróleo e Biocombustíveis) – Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

FOSTON, M. B.; HUBBELL, C. A.; RAGAUSKAS, A. J. **Cellulose isolation methodology for NMR analysis of cellulose ultrastructure.** Materials (Basel), v. 4, p. 1985–2002, 2011.

HSIA, L. A. **Desenvolvimento de biocompósitos de poli(ϵ -caprolactona) reforçados com fibras de celulose de eucalipto.** 2024. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

KUMAR, S.; PRASAD, L.; BIJLWAN, P. P.; YADAV, A. **Thermogravimetric analysis of lignocellulosic leaf-based fiber-reinforced thermosets polymer composites: an overview.** 2022. Volume 14, p. 12673–12698, 2024.

MANSUR, H. S.; SADAHIRA, C. M.; SOUZA, A. N. et al. **FTIR spectroscopy characterization of poly (vinyl alcohol) hydrogel with different hydrolysis degree and chemically crosslinked with glutaraldehyde**. *Materials Science and Engineering C*, v. 28, p. 539-548, 2008.

MORENO, A.; SIPPONEN, M. H. **Lignin-based smart materials: a roadmap to processing and synthesis for current and future applications**. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1039/D0MH00798F>

NURAZZI, N. M.; ASYRAF, M. R. M.; RAYUNG, M.; NORRAHIM, M. N. F.; SHAZLEEN, S. S.; RANI, M, S. A.; SHAFI, A. R.; AISYAH, H. A.; RADZI, M. H. M.; SABARUDDIN, F. A.; ILYAS, R. A.; ZAINUDIN, E. S.; ABDAN, K. **Thermogravimetric Analysis Properties of Cellulosic Natural Fiber Polymer Composites: A Review on Influence of Chemical Treatments**. *Polymers*, v. 13, n. 16, p. 2710, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162710>

PAPPA, C. P.; CAILOTTO, S.; GIGLI, M.; CRESTINI, C.; TRIANTAFYLLIDIS, K. **S. Kraft (Nano)Lignin as Reactive Additive in Epoxy Polymer Bio-Composites**. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16040553>

PHYO, P.; GU, Y.; HONG, M. **Impact of acidic pH on plant cell wall polysaccharide structure and dynamics: insights into the mechanism of acid growth in plants from solid-state NMR**. *Cellulose*, v. 26, p. 291-304, 2019.

PINTO, Y. M. C.; SILVA, J. P.; NOBRE, F. X.; NASCIMENTO, M. V. B.; NETO, F. B.; OLIVERIA, D. P.; COSTA, J. C. M.; MILÉRIO, J. V. G.; SANCHES, E. A.; CHOSH, A.; AGUILERA, L.; LEYET, Y. **Understanding the LiOH effect on PVA membranes**

from an experimental vision and a density functional theory study. 2023.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08896-4>

RAJU, V.; REVATHISWARAN, R.; SUBRAMANIAN, K. S.; PARTHIBAN, K. T.; CHANDRAKUMAR, K.; ANOOP, E. V.; CHIRAYL, C. J. **Isolation and characterization of nanocellulose from selected hardwoods, viz., Eucalyptus tereticornis Sm. and Casuarina equisetifolia L., by steam explosion method.**

2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26600-5>

RAMESH, M.; RAJESHKUMAR, L.; SASIKALA, G.; BALAJI, D.; SARAVANAKUMAR, A.; BHUVANESWARI, V.; BHOOPATHI, R. **A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects.** 2022.

DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14030589>

SENA, A. S.; NAHIME, B.; LIMA, E. C.; LOBO, F. A.; AKASAKI, J. L.; SANTOS, I. S. **Characterization of briquettes produced from eucalyptus wood waste generated in agro-industries.** v. 25, n. 11, p. 794-798, 2021.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n11p794-798>

SHARIFF, A. et al. **Corn cob as a potential feedstock for slow pyrolysis of biomass.** J. Phys. Sci., v. 27, n. 2, p. 123–137, 2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.21315/jps2016.27.2.9>

TONZAR, C. K. **Gestão de resíduos: quais são as principais estratégias que podem ser adotadas no setor moveleiro?** Setor Moveleiro, 2024. Disponível em: <https://setormoveleiro.com.br/gestao-de-residuos/>. Acesso em: 02 de junho de 2024.

TRANSRESIND. **The residues of the furniture industry**. Setembro, 2021.
Disponível em: <https://transresind.com.br/os-residuos-da-industria-moveleira/>.
Acesso em: 02 de junho de 2024.

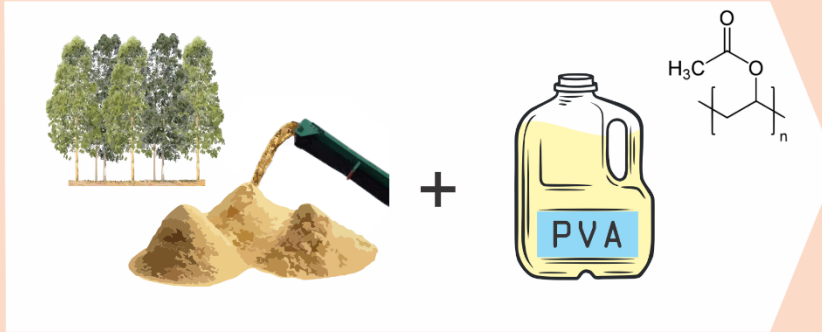
TSIOPTIAS, C.; FARDIS, D.; NTAMPOU, X.; TSIVINTZELIS, I.; PANAYIOTOU, C. **Thermal Behavior of Poly(vinyl alcohol) in the Form of Physically Crosslinked Film**. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15081843>

VIANA, Ana Carolina Costa. **Soldagem das madeiras de pinus, eucalipto itaúba por fricção rotativa**. 2023. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

XU, Jun-Li; GOWEN, Aoife A. **Time series Fourier transform infrared spectroscopy for characterization of water vapor sorption in hydrophilic and hydrophobic polymeric films**. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.119371>

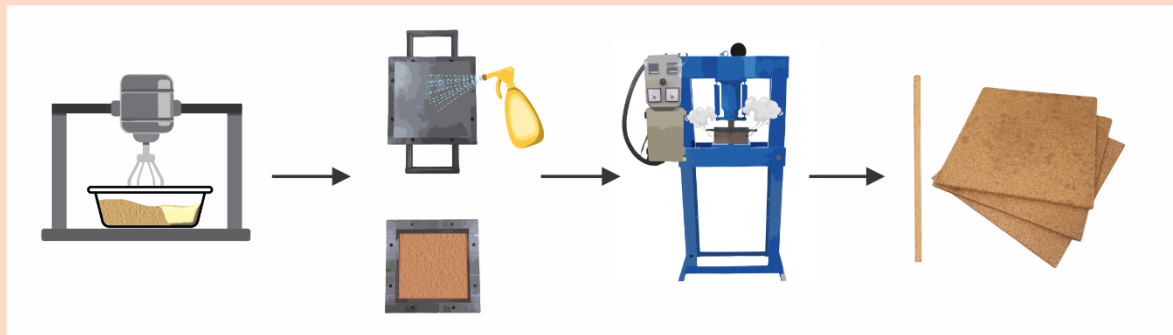
CAPÍTULO 2

Graphical Summary



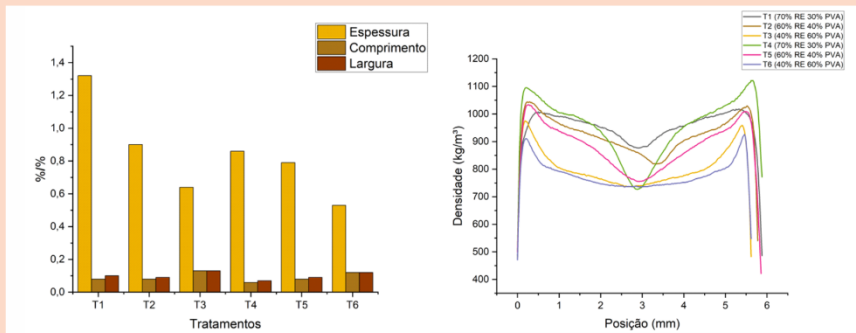
Benefits

-  Sustainability
-  Innovation
-  Low cost



Essays

- Cyclic
- Dimensional Stability
- X-ray Microdensitometry



Análise das Propriedades Físicas de Compósitos Plástico-Madeira Derivados de Resíduos da Indústria Madeireira Capixaba

RESUMO

A crescente demanda por materiais sustentáveis e a necessidade de gestão eficiente dos resíduos da indústria madeireira impulsionam a busca por alternativas para a valorização desses materiais. Neste estudo, foram desenvolvidos e caracterizados compósitos plástico-madeira a partir de resíduos de eucalipto e polivinil acetato (PVA), com o objetivo de avaliar a influência da composição e da granulometria na estabilidade dimensional e densidade dos materiais. Através de ensaios cíclicos, de estabilidade dimensional e de microdensitometria de raios-X foi possível verificar que a proporção de resíduos e PVA, bem como a granulometria, influenciam significativamente as propriedades dos compósitos. Os resultados indicaram que os tratamentos com maior concentração de PVA apresentaram maior estabilidade dimensional, enquanto os materiais com maior teor de resíduo apresentaram maior densidade. A análise da densidade revelou heterogeneidade na estrutura dos materiais, com variações significativas entre o centro e as bordas das amostras. Os ensaios cíclicos demonstraram que os compósitos são suscetíveis a retratibilidade, sendo necessário otimizar a formulação para melhorar a durabilidade. Os resultados deste estudo contribuem para o desenvolvimento de materiais compósitos mais sustentáveis e eficientes, com potencial para diversas aplicações na indústria.

Palavras-chave: Compósitos plástico-madeira, eucalipto, estabilidade dimensional, densidade.

Analysis of the Physical Properties of Wood-Plastic Composites Derived from Capixaba Wood Industry Residues

ABSTRACT

The growing demand for sustainable materials and the need for efficient management of wood industry waste drive the search for alternatives to add value to these residues. In this study, wood-plastic composites were developed and characterized using eucalyptus residues and polyvinyl acetate (PVA), aiming to evaluate the influence of composition and particle size on the dimensional stability and density of the materials. Through cyclic tests, dimensional stability analysis, and X-ray microdensitometry, it was observed that the proportion of residue and PVA, as well as particle size, significantly influenced the properties of the composites. The results indicated that treatments with higher PVA content showed greater dimensional stability, while materials with a higher residue content exhibited greater density. Density analysis revealed heterogeneity in the structure of the materials, with significant variations between the center and edges of the samples. Cyclic tests showed that the composites are susceptible to shrinkage, highlighting the need to optimize the formulation to improve durability. The results of this study contribute to the development of more sustainable and efficient composite materials, with potential for various industrial applications.

Key words: Wood-plastic composites, Eucalyptus, dimensional stability, density.

1 INTRODUÇÃO

A indústria madeireira, que utiliza florestas plantadas e manejadas como matéria-prima, desempenha um papel importante na geração de empregos, renda e na contribuição para a balança comercial brasileira. Em 2022, o valor bruto da produção de madeira sólida foi de R\$ 26,8 bilhões, enquanto a balança comercial do setor registrou US\$ 3,6 bilhões, representando 5,8% do total nacional (ABIMCI, 2022). Embora os ganhos econômicos e sociais sejam significativos, a expansão da produção madeireira também traz desafios ambientais, principalmente relacionados à gestão inadequada dos resíduos sólidos gerados pelas atividades do setor (COSTA et al., 2020).

O processo de transformação de toras em madeira serrada resulta em uma quantidade significativa de resíduos, frequentemente superior ao volume do produto final obtido. Esses resíduos podem causar impactos ambientais relevantes, como assoreamento, poluição de rios e emissões atmosféricas decorrentes da sua queima para eliminação. Os resíduos de madeira podem ser classificados em três categorias principais: serragem (proveniente das operações de serras), cepilho (gerado pelas plainas) e lenha (incluindo topos de toras e restos de lâminas) (OLIVEIRA et al. 2019). Uma alternativa para a destinação dos resíduos madeireiros é a produção de compósitos plástico-madeira, que combina madeira com resinas termofixas ou termoplásticas (KIELING et al., 2019). O uso do polímero PVA, conhecido por sua transparência, não toxicidade e biodegradabilidade, também contribui para uma solução ambientalmente amigável, já que o PVA, na forma de membrana, é menos prejudicial ao meio ambiente (CANDÉO et al., 2020). Essa abordagem oferece uma destinação sustentável aos resíduos e gera produtos com maior valor agregado.

Além de transformar os resíduos madeireiros em subprodutos, é crucial realizar sua caracterização para garantir a eficácia de sua aplicação. As características dos compósitos são determinadas pelas propriedades físicas e por aspectos das fases constituintes, como suas proporções relativas e a configuração geométrica da fase dispersa (VENTURA, 2009). A caracterização física também assegura que o material resultante seja estável, durável e adequado para as condições a que será exposto, contribuindo para o desempenho geral do produto e sua longevidade.

O aproveitamento de resíduos da indústria madeireira do Espírito Santo na fabricação de compósitos plástico-madeira (CPM) destaca-se como uma alternativa viável e

sustentável. O poli(álcool vinílico) (PVA) é uma opção atrativa para esse tipo de compósito. Pesquisas anteriores envolvendo resíduos madeireiros concentraram-se em matrizes poliméricas tradicionais, que apresentam restrições ambientais. Diante disso, a associação entre resíduos de *Eucalyptus* sp. (RE) e PVA propõe uma estratégia inovadora voltada tanto para a redução do desperdício de recursos quanto para a obtenção de materiais com capacidade de degradação controlada no meio ambiente.

Este estudo tem como objetivo avaliar as propriedades físicas dos compósitos plástico-madeira em diferentes granulometrias e concentrações de resíduos, utilizando ensaios cíclicos, estabilidade dimensional e microdensitometria de raio X. A caracterização dessas propriedades é fundamental para compreender o comportamento dos materiais e sua aplicabilidade em diversas áreas, como construção civil, móveis e revestimentos. Ao analisar esses aspectos, busca-se não apenas otimizar a utilização dos resíduos madeireiros, mas também oferecer uma solução sustentável, agregando valor aos subprodutos da indústria e contribuindo para a redução dos impactos ambientais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Produção do Compósito plástico-madeira

Os resíduos de eucalipto (RE) foram coletados em uma serraria localizada no Município de Alegre, Espírito Santo, e submetidos a um processo de secagem em estufa a 100°C por 24 horas antes de serem triturados em um moinho de facas (passos I e II na Figura 1). Após a trituração, os resíduos foram peneirados utilizando um peneirador automático com malhas de 20, 35 e 60 mesh, optando-se por trabalhar com as frações granulométricas retidas nas malhas de 35 e 60 mesh (passos III, IV e V na Figura 1).

As concentrações de resíduos de eucalipto (RE) e polivinil acetato (PVA) foram organizadas em dois grupos, de acordo com a granulometria utilizada (Tabela 1).

Tabela 1 - Concentrações de resíduos de eucalipto (RE) e polivinil acetato (PVA).

Granulometria 35 mesh	Granulometria 60 mesh	Concentrações (%)
Tratamento 1	Tratamento 4	70% de RE e 30% de PVA
Tratamento 2	Tratamento 5	60% de RE e 40% de PVA
Tratamento 3	Tratamento 6	40% de RE e 60% de PVA

Fonte: Próprio autor

A pesagem precisa dos resíduos e do PVA foi realizada para garantir que cada tratamento atendessem à densidade alvo de 650 kg/m³ (VI). Em seguida, a mistura dos componentes foi feita em um misturador portátil (VII), garantindo a homogeneidade da composição. Para evitar a aderência, foi aplicado desmoldante PURA 28014W da Chem Trend nos moldes (VIII).

A prensagem das placas ocorreu no Laboratório de Experimentação Tridimensional (LET) da Escola de Arquitetura e Design da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Foi utilizada uma prensa hidráulica Bovenau, modelo P30000, com capacidade de 30 toneladas (IX). O processo de prensagem foi realizado em duas etapas: na primeira, aplicou-se uma força de 8 a 14 toneladas a 150°C para remover o ar; na segunda, uma força final de 20 toneladas foi mantida à mesma temperatura por 5 minutos para consolidar as placas com dimensões de 170 x 170 x 6 mm.

Após a prensagem, as placas foram cuidadosamente removidas dos moldes (X) e levadas para corte. O corte foi realizado em uma serra circular de bancada (XI) com distribuição na placa de forma aleatória, visando minimizar a interferência de fatores externos. As amostras cortadas (XII) foram armazenadas e preparadas para os ensaios subsequentes.

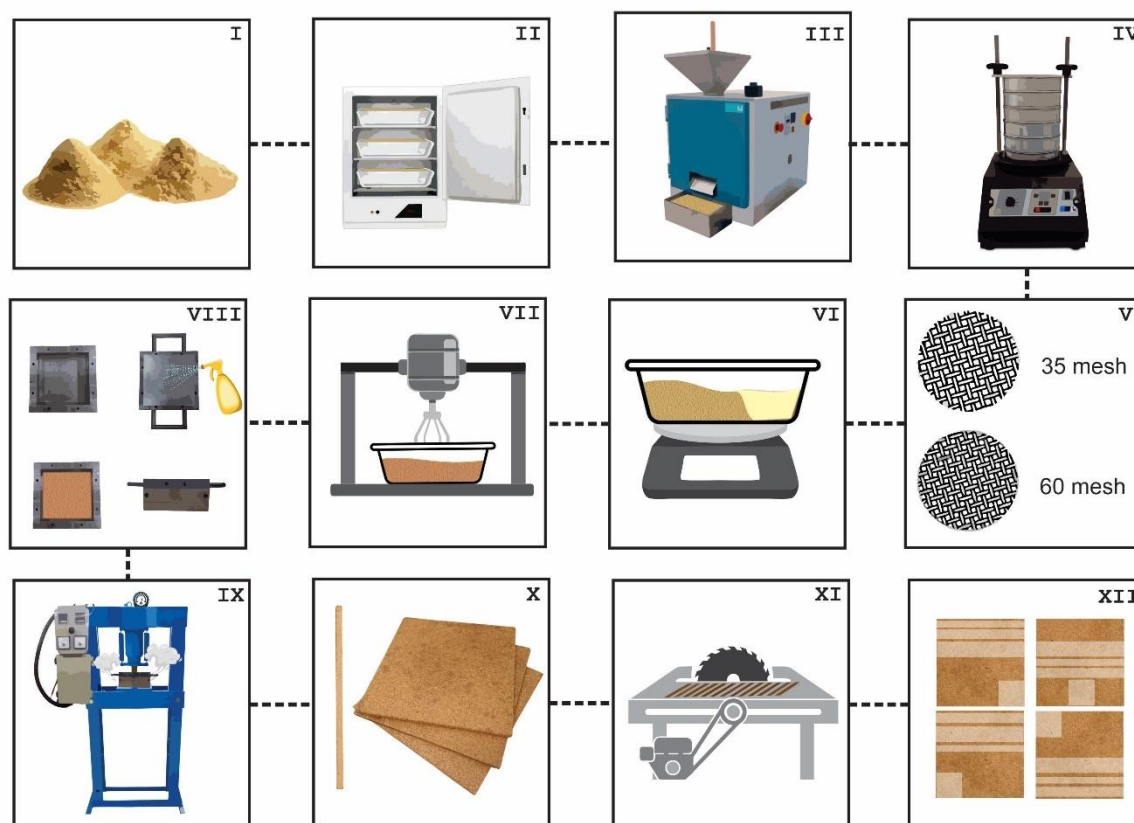


Figura 1 – Fluxograma de produção do Compósito plástico-madeira.

Fonte: próprio autor.

2.2. Estabilidade Dimensional

Os ensaios de estabilidade dimensional seguiram as prescrições da norma EN 318: 2002. Foram ensaiados 36 corpos de provas, proveniente de 6 placas. De cada placa, foram ensaiados 6 corpos de provas, identificadas de modo a permitir o reconhecimento da placa de origem de cada uma.

Foram efetuadas três marcações sobre a linha central de cada corpo de prova (duas a 50 mm de distância dos topos e uma no centro). Cada Tratamento passou pelas três etapas de condicionamento descritas no Quadro 1.

Quadro 1 – Ambientes de condicionamento

Etapas	Condicionamento
1	20°C±1°C de temperatura e 30%±3% de umidade relativa do ar
2	20°C±1°C de temperatura e 65%±3% de umidade relativa do ar
3	20°C±1°C de temperatura e 85%±3% de umidade relativa do ar

A duração de cada etapa variou conforme o tempo necessário para estabilização do peso dos corpos de prova em cada ambiente. Após atingir a estabilização em cada uma das etapas (1, 2 e 3), foram realizadas a pesagem e a medição das dimensões (espessura, largura e comprimento) dos corpos de prova. No final da Etapa 1, ao observar a presença de empenamento nos corpos de prova, passou-se a medir o grau de empeno em todas as três etapas.

A variação relativa da espessura foi calculada com base na seguinte fórmula da EM 318:

$$\delta t_{65,85} = \frac{t_{85} - t_{65}}{t_{65}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Onde:

$\delta t_{65,85}$: variação relativa da espessura devida à variação da umidade relativa ambiente de 65% para 85%;

t_{85} : é a espessura a 85% de umidade relativa;

t_{65} : é a espessura a 65% de umidade relativa.

$$\delta t_{65,30} = \frac{t_{65} - t_{30}}{t_{30}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

Onde:

$\delta t_{30,65}$: é a variação relativa da espessura devida à variação da umidade relativa ambiente de 30% para 65%;

t_{30} : é a espessura a 30% de umidade relativa;

t_{65} : é a espessura a 65% de umidade relativa.

2.2. Ensaio Cíclico

Os ensaios cíclicos foram realizados conforme a norma EN 321:2010, que estabelece o método de envelhecimento acelerado em materiais. Foram testados seis corpos de prova obtidos de uma placa composta por 60% de resíduo e 40% de PVA com granulometria de 35 mesh, identificados numericamente de 1 a 6. Antes do início dos ensaios, os corpos de prova foram condicionados em um ambiente controlado, com temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $65\% \pm 5\%$, até que apresentassem

uma variação de massa inferior a 0,1% entre pesagens consecutivas realizadas com intervalo de 24 horas.

Após o condicionamento, foi realizada a medição da espessura dos corpos de prova na interseção das diagonais traçadas nas faces das amostras. Cada ensaio cíclico consistiu na execução de três ciclos, sendo que cada ciclo foi composto por três etapas sequenciais, descritas no Quadro 2.

Quadro 2 – Etapas que compõem cada ciclo

Etapas	Procedimento
1	Imersão dos provetes em água a uma temperatura de $(20\pm 1)^\circ\text{C}$ durante (70 ± 1) hora
2	Colocação em câmara de congelação com temperatura entre -12°C e -25°C , durante (24 ± 1) hora
3	Colocação em estufa de secagem com temperatura de $(70\pm 2)^\circ\text{C}$, durante (70 ± 1) hora

Ao final do primeiro e do segundo ciclos, os corpos de prova foram mantidos em um ambiente controlado, com temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 5\%$, por $4 \pm 0,5$ horas. Após a conclusão de todos os ciclos, os corpos de prova foram recondicionados em um ambiente com temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 5\%$, até que a variação de massa entre duas pesagens consecutivas, realizadas com intervalo de 24 horas, fosse inferior a 0,1%.

As medições de espessura foram realizadas em três momentos: imediatamente após o término do ensaio cíclico (na saída da estufa), após quatro horas em um ambiente controlado ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa), e após a estabilização final dos corpos de prova.

2.3. Microdensitometria de Raio-X

O ensaio de Densitometria de Raios-X foi realizado utilizando o equipamento GreCon DAX 6000 para medir o perfil de densidade aparente dos polímeros. Esse procedimento foi executado no Laboratório Multiusuário de Painéis (LABPA), pertencente ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, em Jerônimo Monteiro, Brasil.

Para a realização do ensaio foram utilizados corpos de prova com dimensões de 50 x 6 x 50 mm (largura, espessura e comprimento), conforme ilustrado na Figura 2. Foram preparadas 12 amostras para cada tratamento.

O equipamento realiza uma varredura contínua ao longo da espessura dos corpos de prova utilizando feixes de Raios-X. As bases foram realizadas por meio de um transdutor de medição otimizado, que combina Raios-X e opera com uma velocidade de varredura de 0,1 mm/s.

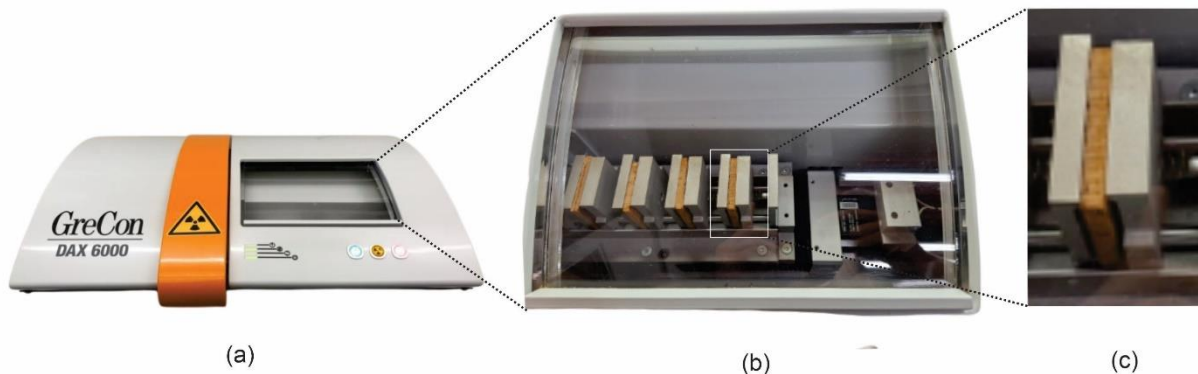


Figura 2 – Medidas de densitometria de raios-x dos compósitos: (a) Microdensitômetro de raios X; (b) compartimento interno de amostra; (c) Porta amostra contendo o corpo de prova em análise.

Fonte: próprio autor.

3 RESULTADO E DISCUSSÕES

3.1. Estabilidade Dimensional

O Quadro 3 apresenta os valores médios da variação dimensional de espessura, comprimento, largura e empenos após as três etapas de condicionamento.

Quadro 3 - Variações médias dimensionais (Espessura, Comprimento, Largura e Empenos) após as três etapas de condicionamento

Variação Dimensional	T1 (70% RE e 30% PVA)		T2(60% RE e 40% PVA)		T3(40% RE e 60% PVA)		T4(70% RE e 30% PVA)		T5(60% RE e 40% PVA)		T6(40% RE e 60% PVA)	
	35 MESH						60 MESH					
	%	DP	%	DP	%	DP	%	DP	%	DP	%	DP
Espeçura												
Etapa 1	-1,7	0,3	-1,5	0,2	-1,2	0,3	-1,9	0,6	-1,2	0,2	-1,5	0,1
Etapa 2	1,5	0,3	1,4	0,1	1,0	0,2	1,6	0,7	1,3	0,1	1,4	0,2
Etapa 3	6,0	0,9	3,9	0,4	2,6	0,2	5,4	2,9	3,3	0,3	2,2	0,5
Comprimento	mm/m	DP	mm/m	DP	mm/m	DP	mm/m	DP	mm/m	DP	mm/m	DP
Etapa 1	-2,8	0,3	-2,8	0,3	-4,6	0,5	-3,0	0,2	-2,8	0,3	-5,3	0,8
Etapa 2	2,2	0,6	2,0	0,8	3,4	0,9	2,2	0,6	2,3	0,5	3,7	1,0
Etapa 3	3,5	0,8	3,5	0,8	5,5	0,5	2,9	0,4	3,1	0,2	5,2	0,3
Largura	mm/m	DP	mm/m	DP	mm/m	DP	mm/m	DP	mm/m	DP	mm/m	DP
Etapa 1	-2,7	1,0	-2,5	0,6	-3,2	0,5	-2,5	0,2	-2,9	0,6	-3,7	0,8
Etapa 2	1,4	0,5	1,8	0,6	2,5	0,7	1,8	0,6	2,6	0,6	3,1	0,9
Etapa 3	4,5	0,6	3,8	0,3	5,2	0,4	3,5	0,6	3,6	0,4	5,2	0,7
Empenos	Mm	DP	mm	DP	mm	DP	mm	DP	mm	DP	mm	DP
Etapa 1	0,46	0,25	0,54	0,29	0,79	0,4	1,00	0,16	0,83	0,26	0,88	0,21
Etapa 2	0,38	0,26	0,54	0,29	0,67	0,49	1,08	0,13	0,75	0,22	0,67	0,26
Etapa 3	1,17	1,93	0,54	0,29	0,75	0,57	1,38	0,34	0,79	0,29	0,58	0,30

A variação nas dimensões dos corpos de prova ao longo das diferentes etapas de condicionamento indica uma forte influência da umidade relativa. Observa-se um aumento geral na espessura ao longo das etapas, as maiores variações ocorrem nas amostras com maior proporção de resíduos (T1 e T4). Esse comportamento é atribuído à presença predominante de material lignocelulósico, cuja principal desvantagem é a alta capacidade de absorção de umidade, resultando em baixa estabilidade dimensional (CAVALCANTI et al., 2020). Esses resultados estão alinhados com o estudo de Ferreira (2022), que produziu compósitos com matriz de HDPE e proporções de reforço de serragem de eucalipto e fibra de vidro, verificando maior retenção de água em amostras contendo fibras naturais, mesmo em condições de baixos teores de umidade.

De forma geral, os tratamentos com maior concentração de PVA (T3 e T6) apresentaram menor variação percentual na espessura ao longo das etapas de condicionamento. Esse comportamento é explicado pela reação química do PVA com os grupos hidroxila da madeira, ocupando os sítios higroscópicos que normalmente absorveriam água, conforme demonstrado por Liu et al. (2015). Essa reação reduz a higroscopicidade das partículas, diminuindo a quantidade de água absorvida e, conseqüentemente, o inchamento em espessura. Por outro lado, o comportamento inverso observado nas variações dimensionais de comprimento e largura é atribuído à maior rigidez proporcionada pelas maiores concentrações de resíduo (T1 e T4), que restringem a expansão nessas direções. Os tratamentos com 60% de resíduo (T2 e T5) apresentaram um comportamento intermediário, indicando que essa proporção representa um ponto de equilíbrio entre estabilidade dimensional e flexibilidade, conforme discutido no mesmo estudo

Esse padrão se explica pela dinâmica de absorção de água e redistribuição de tensões nos compósitos. Os materiais com maior concentração de resíduo apresentaram maior absorção de água, especialmente na região central, o que contribuiu para um maior inchaço na espessura. Esse comportamento é consistente com a observação de Oliveira Jr. et al. (2023), que destacam que, na fabricação de painéis por prensagem a quente, a distribuição de tensões durante o processo resulta em uma menor compactação no centro do material, tornando essa região mais suscetível à absorção de água. Por outro lado, os compósitos com maior teor de PVA apresentam uma interação mais eficiente entre matriz e reforço, promovendo maior coesão das partículas de resíduo. Essa interação reduz a variação na espessura, mas impacta proporcionalmente as dimensões de largura e comprimento. Além disso, o aumento

no teor de madeira resulta em maior absorção de umidade, inchaço localizado e menor estabilidade dimensional, conforme observado por Mital'ová et al. (2024).

A presença de empenamento, especialmente nas etapas de maior umidade, indica que o material apresenta anisotropia e heterogeneidade, respondendo de forma não uniforme às variações de umidade. O tratamento T4, apresentou maior susceptibilidade, atingindo 1,38 mm na Etapa 3, o que representa 0,81% da dimensão de comprimento (170mm). Por outro lado, os tratamentos com maior teor de PVA demonstraram melhores desempenho nessa mesma etapa.

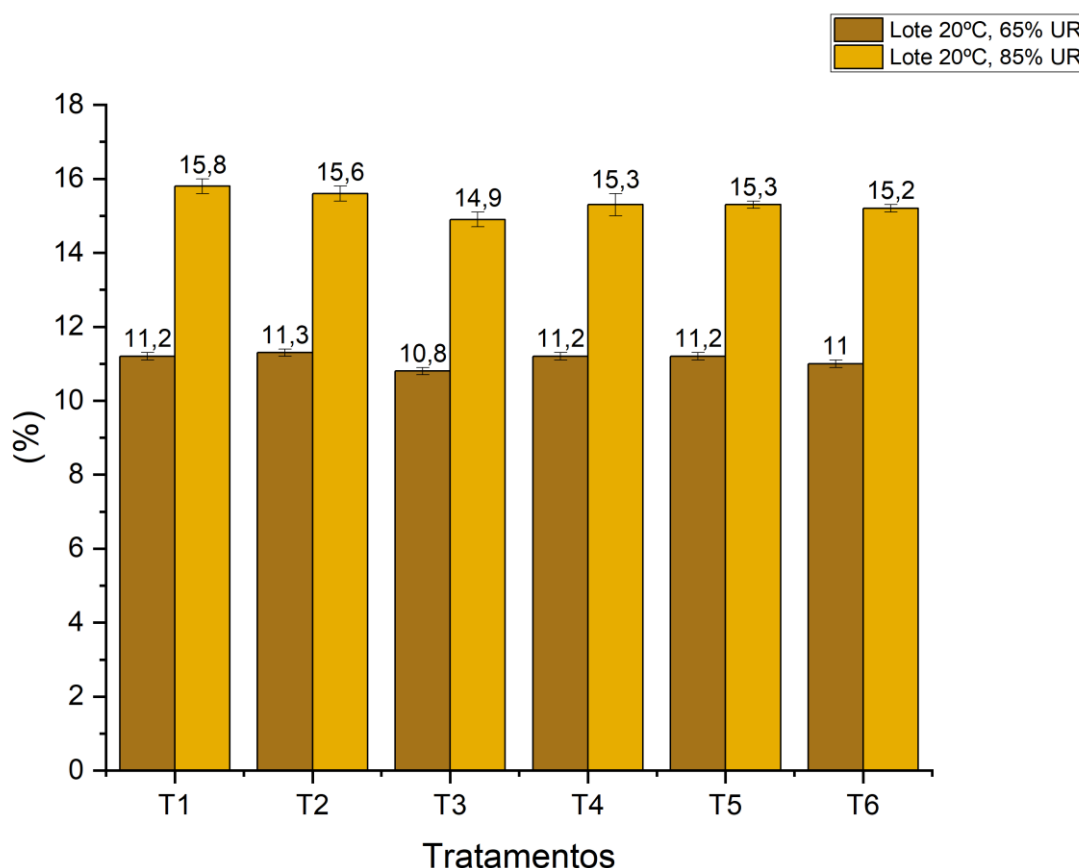


Figura 3 – Teor de água médio por amostra para os dois ambientes.
Fonte: Próprio autor.

Todas as amostras apresentaram variação de umidade entre ambientes com 65% e 85% de umidade relativa (UR) (Figura 3). No entanto, não foi observada uma relação clara entre o tamanho da partícula (mesh) ou a quantidade de resíduo e a absorção de umidade. Os compósitos com menor teores de resíduos apresentam os menores valores de absorção de água. Em conformidade com os estudos de Rejeb et al. (2021), que produziram compósitos com 50%, 60% e 70% de fibras de celulose em matriz de

polipropileno, os compósitos carregados com 50% de fibras apresentaram melhor desempenho na presença de água, explicando-se pela rugosidade da superfície, que é mais importante em compósitos com alto teor de fibras.

Os valores dos coeficientes de variação dimensional (Figura 4) indicam a variação das dimensões em função da alteração de 1% no teor de água da amostra, durante a variação entre 65% e 85% de umidade relativa.

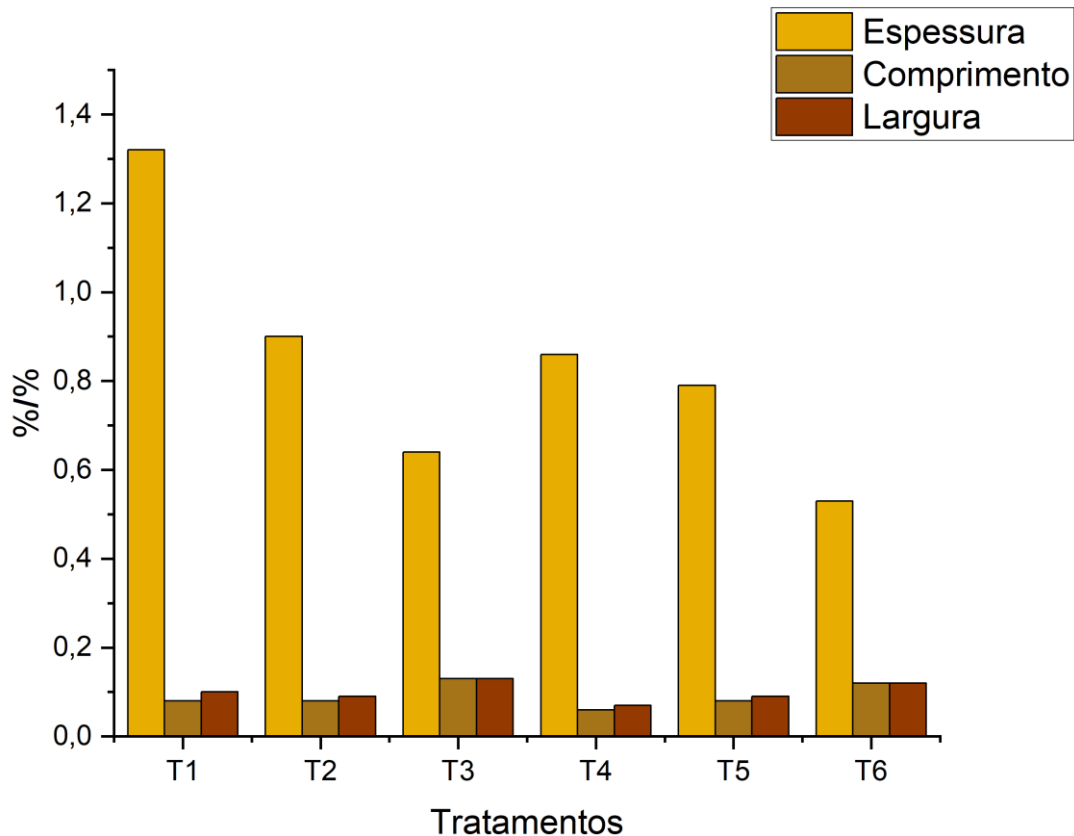


Figura 4 - Coeficientes de variação dimensional

Fonte: Próprio autor.

Observou-se que a maior variação foi registrada na espessura, com valores médios variando de 1,32% (T1) a 0,53% (T6). Compósitos com maior teor de resíduo (70%) e granulometria mais grossa (35 mesh) apresentaram maior sensibilidade às alterações de umidade, enquanto o T6, com menor proporção de resíduo (40%) e granulometria mais fina (60 mesh), exibiu maior estabilidade dimensional na espessura. Para as dimensões de comprimento e largura, os menores coeficientes de variação foram observados nas composições com maior teor de resíduo (60% e 70%), como T4 (0,06% em comprimento e 0,07% em largura) e T5 (0,08% em comprimento e 0,09%

em largura), indicando que concentrações maiores de resíduo contribuem para maior estabilidade nessas dimensões.

Comparando esses resultados com os limites estabelecidos pela norma EN 312 para as classes P4 (uso estrutural em ambientes secos), P5 (uso estrutural em ambientes úmidos), P6 (uso não estrutural em ambientes secos) e P7 (uso não estrutural em ambientes úmidos), verificou-se que nenhum dos tratamentos atendeu aos requisitos para comprimento e largura, cujos limites máximos são de 0,05% e 0,04%, respectivamente. Contudo, em relação à espessura, apenas o T6 demonstrou proximidade ao limite de 0,7% para as classes P4 e P6, excedendo ligeiramente o limite de 0,5% para as classes P5 e P7. Esses resultados indicam que composições com menor teor de resíduo e granulometria mais fina favorecem a redução da variação dimensional na espessura, no entanto, observa-se que os compósitos não devem ser submetidos a umidades elevadas.

3.2. Cíclico

Na Figura 5, são apresentados os valores médios de inchamento em espessura (%) dos seis corpos de prova obtidos de uma placa do Tratamento 2 (60% RE e 40% PVA) após o 3º ciclo na estufa, após 4 horas de recuperação a 20°C e 65% HR, e após o acondicionamento completo. A escolha do Tratamento 2 como base para essa análise se deve à sua composição intermediária, representando um comportamento esperado para os demais tratamentos, o que justifica sua seleção como tratamento representativo para o estudo do inchamento durante o ensaio cíclico.

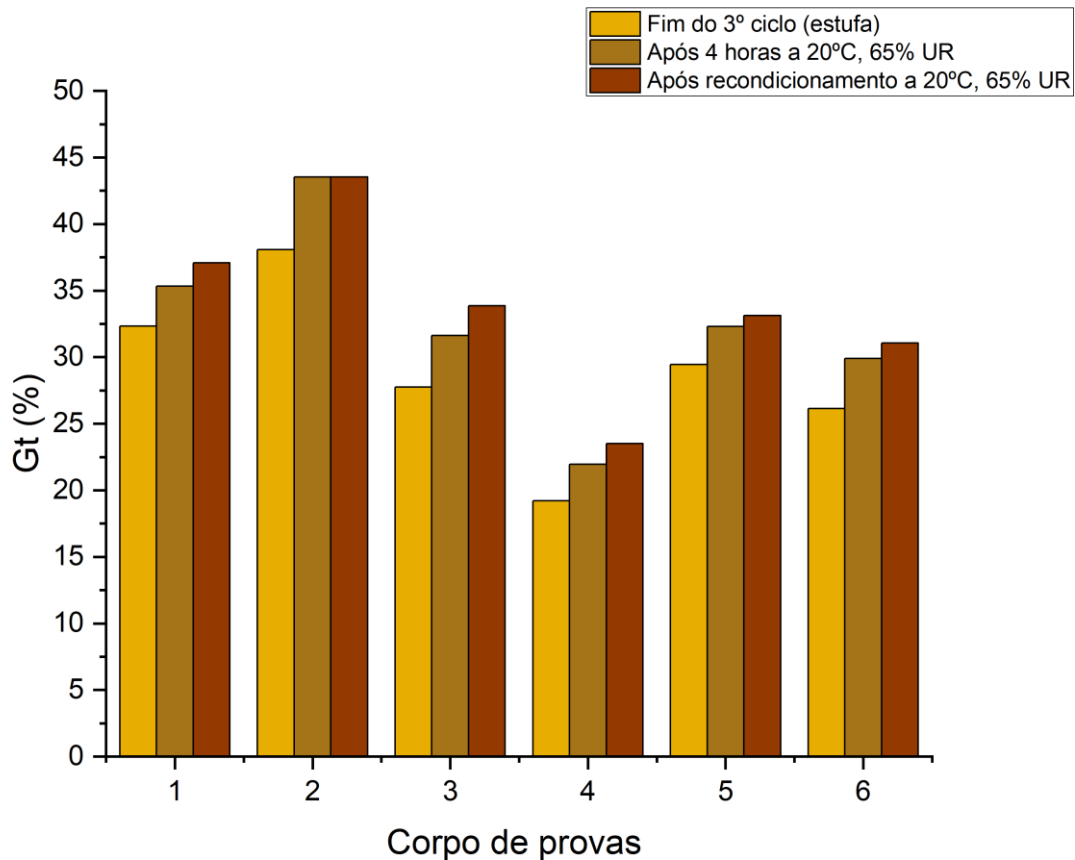


Figura 5 - Inchamento em espessura Gt (%)

Fonte: Próprio autor

Os valores médios de inchamento em espessura aumentam progressivamente, alcançando 33,70% após o recondicionamento. Após a estufa, o inchamento é reduzido pela secagem forçada, mas aumenta significativamente após 4 horas em ambiente controlado, indicando reabsorção de umidade. Esse comportamento se intensifica após o recondicionamento, quando os materiais atingem equilíbrio com a umidade ambiental.

Bertolini et al. (2019) observaram inchamentos em espessura de 4,27% e 4,11% em 2 horas, e de 11,06% e 10,52% em 24 horas, utilizando 12% e 15% de resina PU-mamona, respectivamente. Mesquita et al. (2018) obtiveram inchamentos de 13% (2 h) e 21% (24 h) para painéis de fibras de açaí tratadas com resina poliuretana de óleo de mamona, e de 20% (2 h) e 35% (24 h) para fibras não tratadas. Resinas poliméricas, geralmente são hidrofóbicas, reduzem a absorção de água, enquanto o PVA, por ser hidrofílico (FARIA et al., 2012), aumenta a umidade absorvida, especialmente combinado aos resíduos de eucalipto, que são altamente higroscópicos. Gallio et al. (2018) reforçam que espécies como *Eucalyptus dunnii* e

Eucalyptus saligna possuem elevada capacidade de absorção de água, influenciando diretamente o comportamento observado.

Durante o primeiro ciclo de ensaio, o corpo de prova 2 apresentou ruptura, separando-se em duas partes (Figura 6). Os corpos de provas 1 e 3 também desenvolveram fissuras logo no primeiro ciclo, ficando ainda mais comprometidos ao final dos três ciclos. Nos corpos de provas 4, 5 e 6, observou-se o surgimento de pequenas fissuras já no primeiro ciclo, as quais aumentaram de forma moderada ao longo dos ciclos. Mostrando assim a fragilidade do compósito quando submetido a umidade.

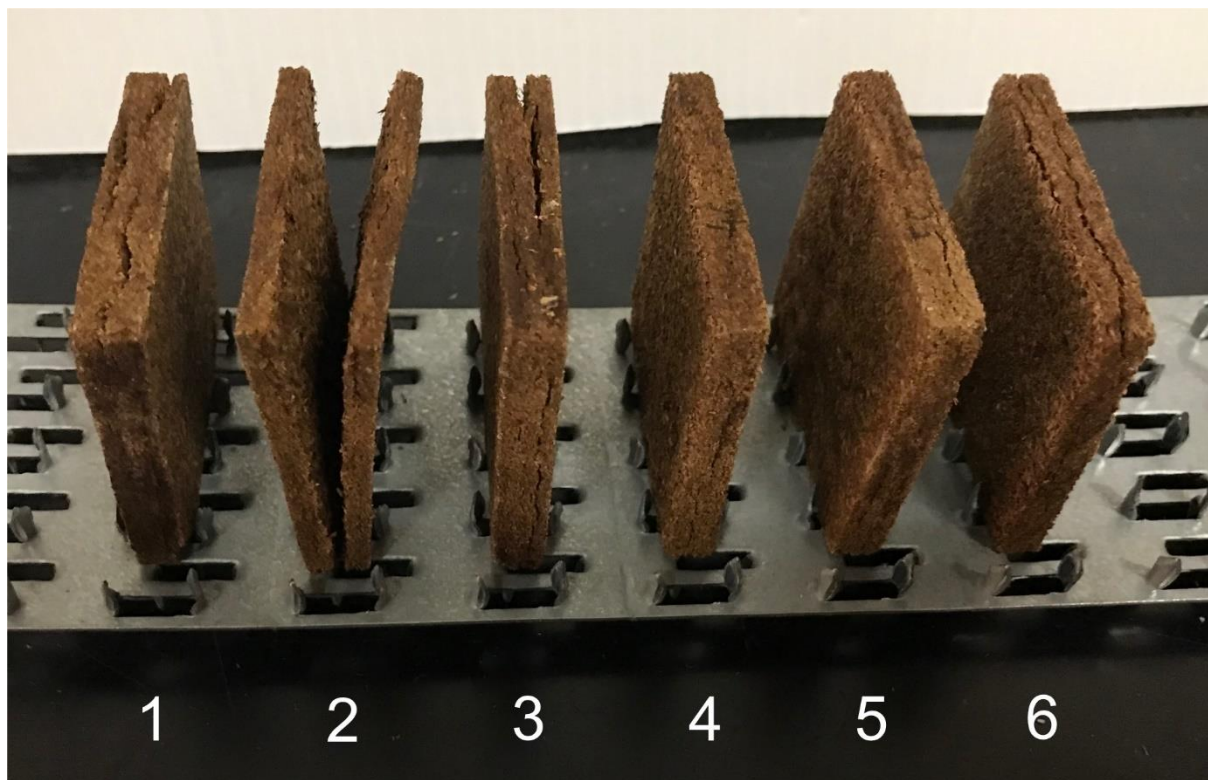


Figura 6 – Aspeto dos corpos de provas após o fim dos 3 ciclos

Fonte: próprio autor.

A separação do corpo de prova 2 e as fissuras observadas em outros corpos de prova quando comparados aos valores normativos da NP EN 312, os corpos de prova testados apresentaram desempenho inferior. A norma estabelece limites de 12% para painéis P5 (painéis com uso geral de madeira) e 11% para P7 (painéis de uso estrutural), valores significativamente menores do que os observados, evidenciando a necessidade de ajustes na formulação ou no processo de produção para melhorar a estabilidade dimensional dos compósitos.

3.2. Microdensitometria de Raio-X

A tabela 2 apresenta os valores das médias da densidade aparente, desvio padrão e agrupamento estatístico dos tratamentos T1 a T6, obtidos por meio de densitometria de raio-X. A análise desses dados revela as seguintes tendências: o aumento da proporção de PVA tende a reduzir a densidade aparente, enquanto o aumento do RE está associado ao aumento da densidade. Além disso, a granulometria mais grossa tende a resultar em densidades mais altas, enquanto a granulometria mais fina está relacionada a densidades mais baixas.

Tabela 2 – Dados de densidade por Densitometria de raios-X.

Tratamentos	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Densidade Aparente (kg/m ³)	952,17	926,22	803,85	955,63	884,29	778,09
Desvio Padrão	152,54	172,9	194,93	150,84	158,67	180,87
Agrupamento	A	B	D	A	C	E

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey p >0,05).

Os valores de densidade aparente variaram de 778 kg/m³ (T6) a 955 kg/m³ (T4), com uma variação de 18,5%, evidenciando heterogeneidade entre as placas, mesmo com um processo de fabricação uniformizado. A análise dos desvios padrão confirmou maior uniformidade em T4 (150,84 kg/m³) e maior heterogeneidade em T3 (194,93 kg/m³). A classificação em grupos (A, B, C, D, E) reforça a influência da interação entre matriz e reforço na heterogeneidade do lote.

O agrupamento estatístico comprova a similaridade entre os tratamentos em termos de densidade, os tratamentos T1 e T4 (grupo A) destacam-se por apresentarem as maiores densidades, reforçando que uma maior proporção de resíduo favorece uma estrutura mais densa. Essa densidade elevada contribuiu para uma melhor estabilidade dimensional em comprimento e largura, resultando em compósitos mais resistentes a essas deformações. Os tratamentos T3, T5 e T6 tiveram densidades relativamente baixas, influenciadas pela maior concentração de PVA. Esse comportamento é explicado pelo fato de o PVA utilizado ser líquido, contendo aproximadamente 53-55% de água, o que dificulta a compactação adequada e facilita a retenção de ar na estrutura.

Em geral, observa-se que a densidade é maior nas extremidades e menor na região central, indicando uma distribuição não homogênea do material. De acordo com

Oliveira Jr. et al. (2023), ao analisar compósitos ecológicos com serragem de eucalipto e resíduos de chamote (cerâmica), também relataram esse comportamento em painéis fabricados por prensagem a quente. Nesse processo, é comum que as faces superior e inferior apresentem maior densidade, enquanto o centro fica menos compacto. Esse padrão ocorre devido à maior pressão exercida nas extremidades durante a prensagem, explicando a distribuição observada no presente trabalho.

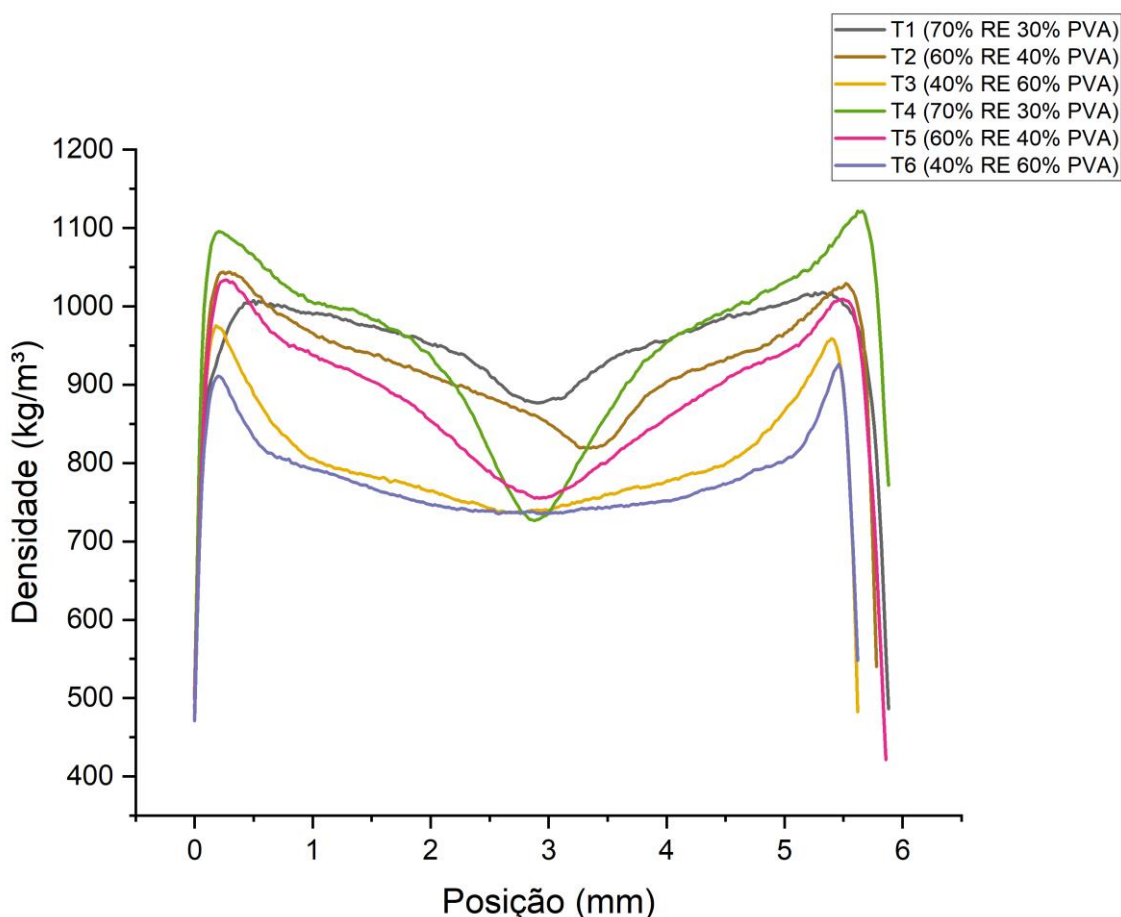


Figura 7 - Valores Médios de densidade aparente obtidos por Densitometria de raios X.
Fonte: Próprio autor.

De forma geral, os valores de densidade aparente variaram entre o centro e as bordas dos painéis, indicando uma distribuição desigual da pressão e diferenças na perda de umidade durante a fabricação. Além disso, as proporções de resíduos e PVA resultaram em densidades diferentes, com cada combinação mostrando comportamentos distintos.

No T1, a densidade média variou entre 875,10 e 1019,55 kg/m³, com menor densidade no centro e maior nas bordas, indicando compactação insuficiente, enquanto no T2 a distribuição foi mais homogênea (824,08 a 1030,31 kg/m³), sugerindo que o aumento

de PVA melhorou a coesão entre partículas, embora mantendo certa heterogeneidade. No T3, houve queda acentuada na densidade central (730,10 a 958,77 kg/m³), com maior concentração de PVA dificultando a eliminação do ar durante a prensagem, resultando em áreas menos densas e menor uniformidade estrutural. Nos tratamentos com granulometria mais fina (60 mesh), a densidade nas extremidades foi maior, mas com queda significativa no centro: no T4, variou entre 727,33 e 1119,98 kg/m³; no T5, os valores foram similares (755,66 a 1031,03 kg/m³), mas com diferenças internas; e o T6 apresentou uma das menores densidades médias (733,56 a 926,88 kg/m³).

O aumento significativo de PVA nos tratamentos reduziu a densidade aparente geral, uma vez que o PVA, além de ser menos denso que o resíduo de eucalipto, introduz um conteúdo elevado de água na mistura, dificultando a eliminação do ar durante a prensagem. Os resultados de Azevedo et al. (2024) mostram densidades variando entre 783 kg/m³ e 939 kg/m³ em compósitos de PEAD reciclado com fibras lignocelulósicas (bagaço, sisal e coco). Assim como no presente estudo, os autores observaram que o tipo e a proporção de fibras influenciam significativamente a densidade final dos compósitos.

A maioria das amostras apresenta uma distribuição de densidade não homogênea, indicando heterogeneidades na estrutura do material. Nos tratamentos com 70% e 60% de resíduos, a redução de densidade ao longo da espessura da placa ocorre de forma mais gradual, enquanto nos tratamentos com 40% de resíduos, observa-se uma densidade significativamente menor na região central em comparação com as bordas. As diferenças percentuais de densidade entre as bordas e o centro mostram que, para a granulometria de 35 mesh, nos tratamentos T1, T2 e T3, as variações percentuais aumentam com o incremento da quantidade de PVA: 14,16% em T1, 21,03% em T2 e 24,67% em T3. Por outro lado, para a granulometria de 60 mesh, nos tratamentos T4, T5 e T6, as diferenças percentuais diminuem com o aumento de PVA: 35,06% em T4, 26,71% em T5 e 20,86% em T6. Esses resultados indicam que, para partículas menores (60 mesh), o aumento de PVA promove uma menor heterogeneidade na densidade. Em contrapartida, para partículas maiores (35 mesh), o aumento de PVA contribuiu para uma maior heterogeneidade na distribuição da densidade.

Nos estudos de Rodrigues et al. (2023) sobre a produção de compósitos plástico-madeira utilizando eucalipto e pinus com granulometria de 50 mesh, os autores observaram diferenças na densidade com a diminuição do poliestireno expandido nos

corpos de prova. Os autores indicaram ainda que os valores de densidade obtidos no estudo apresentaram comportamento semelhante aos tratamentos com granulometria de 35 mesh, em que as densidades foram maiores com menor proporção de PVA.

A estabilidade dimensional dos compósitos plástico-madeira (CPM) variou conforme a concentração de resíduo e a densidade das amostras. Observou-se que os tratamentos com maior concentração de resíduo, como T1 (70% resíduo) e T4 (60% resíduo), apresentaram as maiores densidades médias (952,17 kg/m³ e 955,63 kg/m³, respectivamente). No entanto, essa maior concentração de resíduo comprometeu a estabilidade na espessura, resultando em maior variação dimensional ao longo do tempo. Em contrapartida, os tratamentos com menor concentração de resíduo, como T3 e T6, que apresentaram densidades mais baixas (803,85 kg/m³ e 778,09 kg/m³), apresentaram maior estabilidade nas dimensões de espessura e menor em comprimento e largura.

Essa relação sugere que, embora uma maior densidade esteja associada a um preenchimento mais eficiente da matriz, o excesso de resíduo pode aumentar a rigidez e tornar a estrutura mais suscetível a deformações localizadas na espessura. Já nos tratamentos com menores concentrações de resíduo, a matriz polimérica mais abundante pode ter favorecido uma distribuição mais uniforme das tensões, resultando em maior estabilidade nas dimensões de espessura.

4 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo destacam a influência da proporção de resíduos de madeira e PVA nas propriedades físicas dos compósitos plásticos madeira. Os tratamentos T2 e T5, com 60% de resíduos e 40% de PVA, apresentaram o melhor desempenho geral, combinando maior estabilidade dimensional e densidade aparente média, além de menor sensibilidade às variações de umidade. A maior concentração de PVA reduziu a absorção de água e o inchamento na espessura, enquanto os tratamentos com maior teor de resíduos (T1 e T4) exibiram densidade mais elevada, e maior variação dimensional.

A densidade aparente dos compósitos mostrou-se heterogênea, com variações significativas entre o centro e as bordas das amostras. A análise revelou que a granulometria e a proporção dos componentes influenciam diretamente a distribuição da densidade e a integração entre a matriz polimérica e os resíduos. Os compósitos T2 e T5 destacaram-se como promissores para possíveis aplicações industriais, como painéis de móveis, revestimentos e construção civil, combinando eficiência, desempenho e valorização de resíduos lignocelulósicos.

REFERÊNCIAS

ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. **Estudo Setorial 2022: ano base 2021**. 2022. p. 54-172.

AZEVEDO, H. M. da S. A. R. de; BARROS, G. de S.; SILVA, G. de O. da; FARIA, A. D.; SANTOS, M. C. C. dos; LIBANO, E. V. D. G.; PEREIRA, P. S. da
C. COMPÓSITOS DE PEAD RECICLADO E FIBRAS LIGNOCELULÓSICAS: EFEITO DO TIPO DE FIBRA, DO TEOR E DO AGENTE COMPATIBILIZANTE.
Revista Contemporânea, v. 4, n. 4, e3546, 2024.
DOI: <https://doi.org/10.56083/RCV4N4-064>

BERTOLINI, M. S.; MORAIS, C. A. G.; LAHR, F. A. R.; FREIRE, R. T. S.; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L. **Painéis de partículas de resíduos de Pinus sp. tratados com CCB e resina de óleo de mamona: análises morfológicas e propriedades físico-mecânicas.** J. Mater. Civ. Eng., v. 31, 05019003, 2019.

CAVALCANTI, W. M.; OLIVEIRA, L. S.; CANGUSSU, L. B.; MAZIERO, R.; CASTRO, D. **PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MECÂNICA DE COMPÓSITOS A PARTIR DE RESÍDUOS DE MADEIRA DA CONSTRUÇÃO CIVIL E RESINAS EPÓXI DE ÓLEOS VEGETAIS.** 3º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 2020. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2020/VII-004.pdf>. Acesso em: 15 de agosto de 2024.

COSTA, D. D.; MARTINS, B. C.; COELHO, J. C. F.; OLIVEIRA, F. N. L.; NAGY, A. C. G. **GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO PÓLO INDUSTRIAL MADEIREIRO DE CRUZEIRO DO SUL, ACRE.** In: **Engenharia Florestal: Desafios, Limites e Potencialidade.** p. 425-441, 2020. DOI: 10.37885/200801143.

FARIA, F. O.; VERCELHEZE, A. E. S.; MALI, S. **Propriedades físicas de filmes biodegradáveis à base de amido de mandioca, álcool polivinílico e montmorilonita.** Quím. Nova, v. 35, n. 3, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000300009>

GALLIO, E.; ZANATTA, P.; RIBES, D. D.; BELTRAME, R.; GATTO, D.
A. Higroscopicidade da madeira de três espécies florestais deterioradas por térmitas Nasutitermes. Pesquisa Florestal Brasileira, 2018. DOI: 10.4336/2018.pfb.38e201701528

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 321:2010: Wood-based panels - Determination of moisture resistance under cyclic test conditions.** Brussels: CEN, 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 318:2002: Wood-based panels - Determination of dimensional changes associated with changes in relative humidity.** Brussels: CEN, 2002.

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

LIU, Y.; WANG, H.; YU, G. et al. **Publicado em: Journal of Applied Polymer Science**, 2015. DOI: 10.1002/app.42345

MITAL'OVÁ, Z.; MITAL, D.; BERLADIR, K. **A Concise Review of the Components and Properties of Wood–Plastic Composites.** Polymers, v. 16, n. 11, 1556, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16111556>

OLIVEIRA, S. F.; ROSARIO, A. C.; SILVA, N. M.; SOARES, C. R.; SANTOS, P. S. B. **Quantificação de resíduos madeireiros de uma serraria.** IV CBCTEM, 2019. Disponível em: <https://iv.cbctem.com.br/submissao-trabalho/resumo/UG1XK1R6c1BzRXN1RFJISE1hSndkdz09/>. Acesso em: 15 de agosto de 2024.

OLIVEIRA JR, J. N.; LOPES, F. P. D.; SIMONASSI, N. T.; OLIVEIRA, M. P.; GONÇALVES, F. G.; VIEIRA, C. M. F. **Evaluation of Hot Pressing Processing by Physical Properties of Ecofriendly Composites Reinforced by Eucalyptus Sawdust and Chamotte Residues**. *Polymers*, v. 15, n. 8, 1931, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15081931>

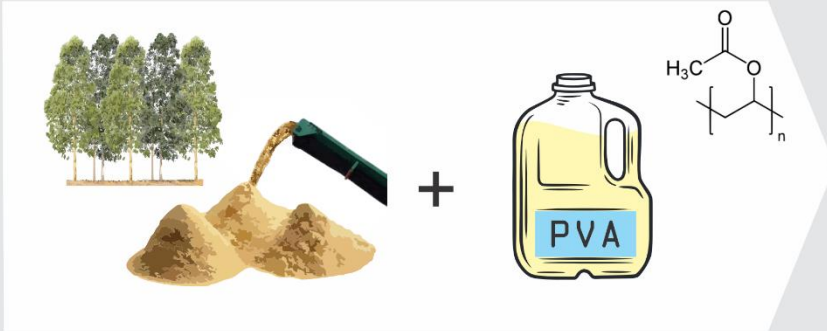
REJEB, M.; KOUBAA, A.; ELLEUCH, F.; GODARD, F.; MIGNEAULT, S.; KHLIF, M.; MIRAD, HATEM. **Effects of Coating on the Dimensional Stability of Wood-Polymer Composites**. *Coatings*, v. 11, n. 6, 711, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11060711>

RODRIGUES, F. R.; BISPO, R. A.; CAZELL, P. H.; SILVA, M. J. **Particleboard Composite Made from Pinus and Eucalyptus Residues and Polystyrene Waste Partially Replacing the Castor Oil-Based Polyurethane as Binder**. *Mat. Res.*, v. 26, supl. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2022-0594>

VENTURA, A. M. F. M. **Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas**. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, v. 21, p. 10-19, 2009.

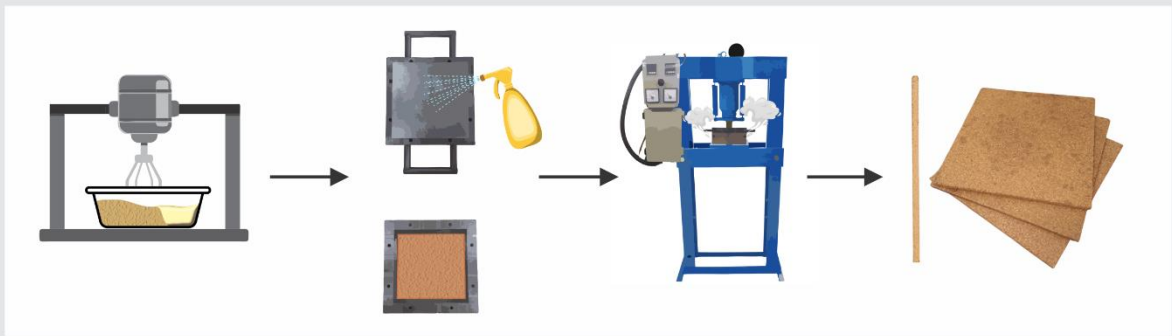
CAPÍTULO 3

Graphical Summary



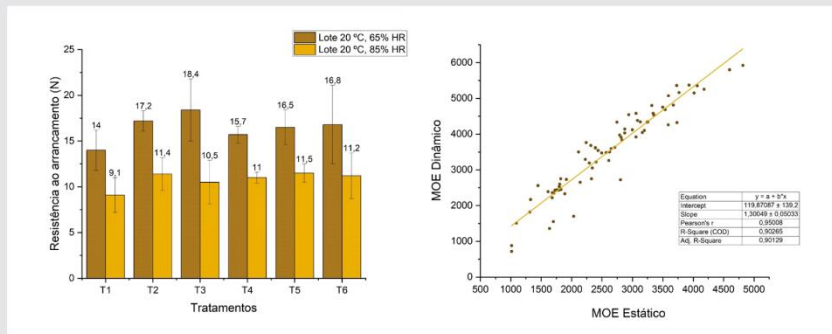
Benefits

-  Sustainability
-  Innovation
-  Low cost



Essays

- Traction
- Parallel compression
- Flexion
- Charpy impact
- Screw pullout
- Sonelastic
- Ultrasonic



Propriedades Mecânicas de Compósitos Plástico-Madeira a partir de resíduos da Indústria Madeireira Capixaba

RESUMO

A crescente demanda por materiais sustentáveis e a necessidade de gestão eficiente de resíduos industriais impulsionam a busca por alternativas inovadoras. Este estudo avaliou a produção de compósitos plástico-madeira (CPM) utilizando resíduos de *Eucalyptus* sp. provenientes da indústria madeireira do Espírito Santo e poli (álcool vinílico) (PVA), com foco nas propriedades mecânicas e nas melhores formulações para aplicações diversas. Foram analisadas diferentes proporções de resíduo (70%, 60% e 40%) e PVA (30%, 40% e 60%), além da granulometria dos resíduos (35 e 60 mesh). As propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaios de tração, compressão, flexão, impacto e arrancamento de parafuso, complementados por ensaios não destrutivos de propagação de ondas para estimar os valores de módulo de elasticidade dinâmico. Os ensaios mostraram que os compósitos com 60% de resíduo de *Eucalyptus* sp. e 40% de PVA tiveram o melhor desempenho nas propriedades mecânicas e elásticas. Além disso, foi possível concluir que a granulometria dos resíduos influenciou a adesão à matriz polimérica. Esses resultados indicam que a combinação adequada entre a proporção de materiais e a granulometria dos resíduos é fundamental para otimizar o desempenho dos compósitos, reforçando seu potencial como alternativa sustentável para aplicações diversas.

Palavras-chave: compósitos plástico-madeira, resíduos, *Eucalyptus* sp., PVA, ensaios mecânicos, propagação de ondas.

Mechanical Properties of Wood-Plastic Composites from Residues of the Capixaba Wood Industry

ABSTRACT

The growing demand for sustainable materials and the need for efficient industrial waste management drive the search for innovative alternatives. This study evaluated the production of wood-plastic composites (WPCs) using *Eucalyptus* sp. residues from the wood industry in Espírito Santo and polyvinyl alcohol (PVA), focusing on mechanical properties and optimal formulations for diverse applications. Different proportions of residue (70%, 60%, and 40%) and PVA (30%, 40%, and 60%) were analyzed, as well as residue particle sizes (35 and 60 mesh). Mechanical properties were assessed through tensile, compression, flexural, impact, and screw pull-out tests, complemented by non-destructive wave propagation tests to estimate dynamic modulus of elasticity. The results showed that composites with 60% *Eucalyptus* sp. residue and 40% PVA performed best in both mechanical and elastic properties. Additionally, it was concluded that residue particle size influenced adhesion to the polymer matrix. These findings indicate that the appropriate combination of material proportions and residue granulometry is essential to optimize composite performance, reinforcing their potential as a sustainable alternative for a range of applications.

Key words: wood-plastic composites, residues, *Eucalyptus* sp., PVA, mechanical testing, non-destructive testing.

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que a demanda por produtos derivados da madeira possa quadruplicar até 2050, impulsionada pelo aumento no uso na construção civil, produção de papel e celulose, e como biomassa para energia (CATANOSO, 2023; GWMI, 2022). No entanto, a cadeia produtiva madeireira no Brasil enfrenta desafios significativos, especialmente em relação à gestão de resíduos. Nem todos os setores contabilizam adequadamente a quantidade de resíduos, o que resulta em impactos ambientais e econômicos negativos (ARAUJO et al., 2015). Além disso, a falta de adaptação de tecnologias avançadas e de iniciativas que promovam a utilização sustentável desses resíduos agrava o problema (PANDEY, 2022).

Nesse cenário, a produção de compósitos plástico-madeira (CPM) com resíduos da indústria madeireira capixaba surge como uma solução sustentável e inovadora. Os CPM são formados por uma matriz polimérica, que pode ser composta por polímeros recicláveis, e um reforço, frequentemente à base de resíduos de madeira ou outros materiais celulósicos. Esses materiais combinam leveza, resistência e sustentabilidade, apresentando potencial para substituir parcialmente os produtos tradicionais à base de madeira ou plásticos em diversas aplicações (CHUIN et al., 2019; KIELING et al., 2019). A utilização de resíduos como reforço contribui para reduzir a pressão sobre os recursos florestais, promovendo o reaproveitamento de materiais descartados.

O compósito plástico-madeira (CPM) é formado pela combinação de madeira e um polímero termoplástico. As propriedades mecânicas do CPM são influenciadas pela estrutura das fases constituintes, pela fração mássica dos materiais e pela geometria da fase dispersa, que envolve forma, tipo, tamanho, distribuição e orientação das partículas. Além disso, a proporção de mistura e o nível de adesão entre as fases também afetam o desempenho do material (CAVALCANTI, et al., 2021).

A utilização de resíduos da indústria madeireira capixaba na produção de compósitos plástico-madeira (CPM) foi explorada com o uso do poli(álcool vinílico) (PVA) como matriz alternativa. Ao contrário de pesquisas anteriores que utilizaram polímeros convencionais com impacto ambiental elevado, este trabalho propõe a combinação de resíduos de *Eucalyptus* sp. (RE) com PVA, visando reduzir o descarte de resíduos e desenvolver compósitos com potencial de degradação controlada.

A caracterização mecânica dos compósitos plástico-madeira é essencial para avaliar suas propriedades e adequação a diferentes condições de uso. Ensaios de tração, compressão, flexão e impacto fornecem informações detalhadas sobre resistência, rigidez e durabilidade (ELTEK, 2024). Esses dados são fundamentais para otimizar o processo de produção, identificando a influência de variáveis como a concentração de resíduos e o tipo de matriz polimérica.

O presente trabalho tem como objetivo a produção de compósitos plástico-madeira utilizando resíduos da indústria madeireira do Espírito Santo, buscando oferecer um destino sustentável para esses materiais. Além disso, a caracterização mecânica desses compósitos é realizada para avaliar seu potencial como produtos comerciais, contribuindo para o desenvolvimento de alternativas inovadoras e ecologicamente corretas que aliem desempenho técnico e sustentabilidade.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Produção de Compósito Plástico-Madeira

A produção do compósito plástico-madeira começou com a coleta de resíduos de *Eucalyptus* sp. em uma serraria no município de Alegre-ES (I). Esses resíduos, úmidos e em diferentes tamanhos, foram submetidos à secagem em estufa a 100°C por 24 horas (II) para garantir a eliminação completa da umidade. Em seguida, os resíduos secos foram triturados em um moinho de facas (III), transformando-os em partículas menores e prontas para peneiramento.

O material triturado foi peneirado em um agitador de peneiras (IV), utilizando malhas de 20, 35 e 60 mesh (V). Para os experimentos, foram selecionadas as frações retidas nas granulometrias de 35 e 60 mesh. A pesagem precisa dos resíduos e do PVA foi realizada (VI) para assegurar a proporção correta em cada tratamento experimental. As concentrações de resíduos de eucalipto (RE) e polivinil acetato (PVA) foram organizadas em dois grupos, de acordo com a granulometria utilizada (Tabela 1).

Tabela 1 - Concentrações de resíduos de eucalipto (RE) e polivinil acetato (PVA).

Granulometria 35 mesh	Granulometria 60 mesh	Concentrações (g)
Tratamento 1	Tratamento 4	147 g de RE e 63 g de PVA
Tratamento 2	Tratamento 5	126 g de RE e 84 g de PVA
Tratamento 3	Tratamento 6	84 g de RE e 126 g de PVA

Fonte: Próprio autor

A pesagem precisa dos resíduos e do PVA foi realizada para garantir que cada tratamento atendesse à densidade alvo de 650 kg/m³ (VI). Em seguida, a mistura dos componentes foi feita em um misturador portátil (VII), garantindo a homogeneidade da composição. Para evitar a aderência, foi aplicado desmoldante PURA 28014W da Chem Trend nos moldes (VIII).

A prensagem das placas ocorreu no Laboratório de Experimentação Tridimensional (LET) da Escola de Arquitetura e Design da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Foi utilizada uma prensa hidráulica Bovenau, modelo P30000, com capacidade de 30 toneladas (IX). O processo de prensagem foi realizado em duas etapas: na primeira, aplicou-se uma força de 8 a 14 toneladas a 150°C para remover o ar; na segunda, uma força final de 20 toneladas foi mantida à mesma temperatura por 5 minutos para consolidar as placas com dimensões de 170 x 6 x 170 mm (largura, espessura e comprimento).

Após a prensagem, as placas foram cuidadosamente removidas dos moldes (X) e levadas para corte. O corte foi realizado de forma aleatória em uma serra circular de bancada (XI), visando minimizar a interferência de fatores externos e garantir a precisão dos corpos de prova. As amostras cortadas (XII) foram armazenadas e preparadas para os ensaios elásticos e mecânicos subsequentes, conforme os tratamentos definidos.

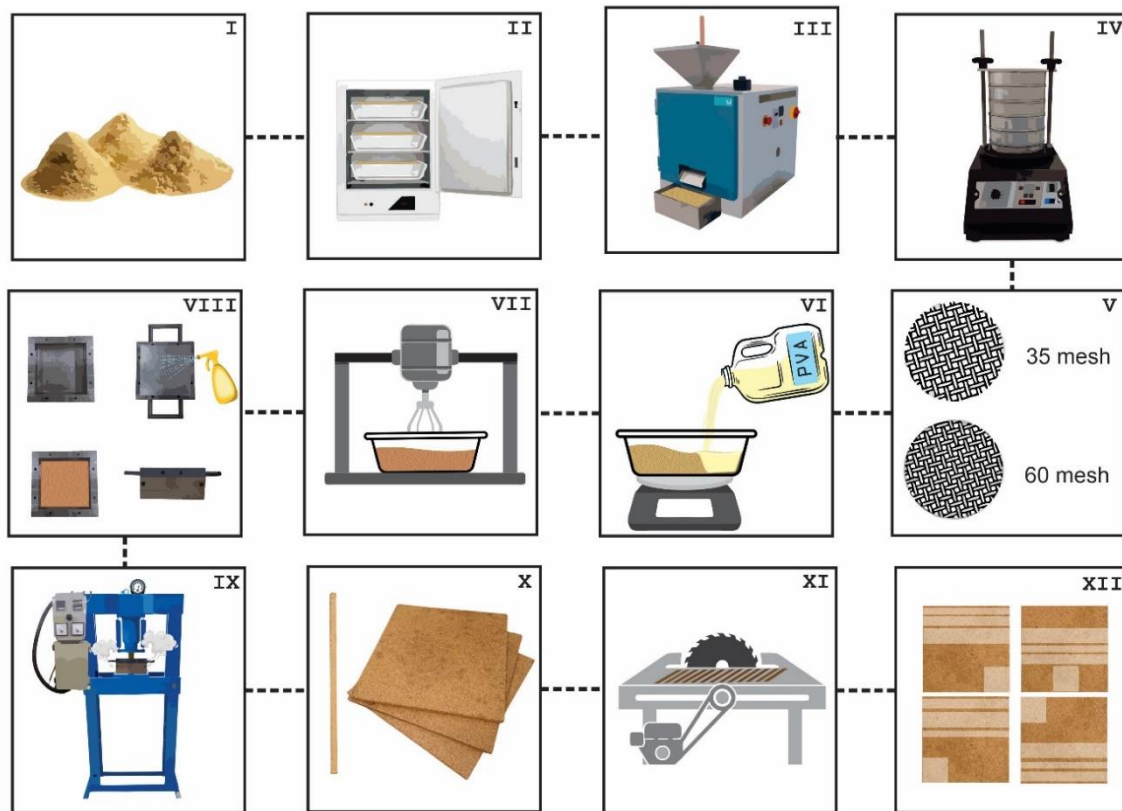


Figura 1 – Fluxograma de produção do Compósito plástico-madeira.

Fonte: próprio autor

2.2. Caracterização Mecânica do Compósito

Os ensaios mecânicos de tração, compressão e flexão estática foram realizados na Máquina Universal de Ensaio Instron, modelo EMIC DL-10000, equipada com uma célula de carga de 5 kN. Esses ensaios foram conduzidos para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais, seguindo normas padronizadas e em condições controladas, com a preparação de corpos de prova conforme os protocolos específicos.

Nos ensaios de tração, realizados conforme a norma ASTM D638-22, a velocidade de separação das garras foi ajustada para 5 mm/min, e os testes ocorreram em temperatura ambiente (25 ± 2 °C). Foram utilizados corpos de prova do Tipo I (Figura 2), e a distância entre as garras foi ajustada para 115 mm. Para análise, considerou-se a tensão máxima de ruptura, com os resultados de 13 corpos de prova.

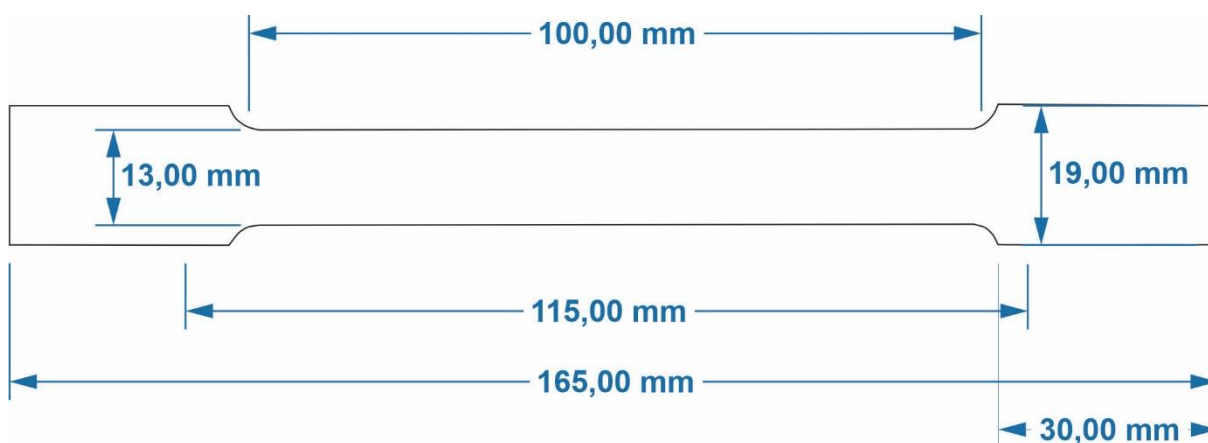


Figura 2 – Dimensões do corpo de prova de Tração.

Fonte: Próprio autor

Os ensaios de compressão paralela seguiram a norma ASTM D6108-19, empregando uma velocidade de teste de 1 mm/min. Foram utilizados 15 corpos de prova por amostra, com dimensões de 30 mm × 12 mm × 6 mm (comprimento, largura e espessura).

O ensaio de flexão estática de 3 pontos foi conduzido em conformidade com a norma ASTM D790-17 (2017). A taxa de deformação foi ajustada para 4 mm/min, e os corpos de prova, preparados de acordo com o “Procedimento A” da norma, possuíam seção transversal retangular de 15 mm × 6 mm x 170 mm (largura, espessura e comprimento). Foram testadas 13 amostras por tratamento, e a partir dos resultados foi possível determinar os valores de Módulo de Elasticidade (MOE) e Módulo de Ruptura (MOR).

A resistência ao impacto das amostras foi avaliada de acordo com a norma ASTM D6110-18, utilizando o teste de impacto Charpy. Os ensaios foram realizados no equipamento ARMS-FIND modelo AFX-7.5. Para cada tratamento, foram usados 15 corpos de prova, testados em temperatura ambiente (aproximadamente 25 ± 2 °C). As dimensões dos corpos de prova foram 127 mm x 12,70 mm x 6 mm (comprimento, largura e espessura). A energia de impacto aplicada foi de 5 J, com uma velocidade de impacto de 2,9 m/s.

Já o ensaio de arrancamento de parafuso foi realizado na máquina universal Shimadzu de 20 kN de capacidade e 0,5 de classe de precisão, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal. O ensaio de resistência ao arrancamento foi baseado na norma EM 13446. O diâmetro do furo de passagem do parafuso adotado foi de 14 mm. O tipo de parafuso usado apresenta marcação CE

segundo a EN14592:2008+A1:2012, apresenta um comprimento 35mm e um diâmetro 4mm.

Foram ensaiados dois lotes de 34 corpos de prova, provenientes de seis placas. De cada placa, foram ensaiados 6 corpos de prova, com dimensões de 50 mm x 50 mm x 6 mm (comprimento, largura e espessura).

Os lotes A e B foram condicionados a 20°C - 65% U.R. e 20°C - 85% U.R., respectivamente. Após a estabilização em ambos os ambientes, foram realizadas a pesagem e a medição das dimensões (espessura, largura e comprimento) dos corpos de prova. Em seguida, foi realizada a perfuração no centro dos corpos de prova, utilizando um diâmetro correspondente a 80% do diâmetro do parafuso escolhido.

2.3. Caracterização elástica do compósito

As amostras dimensionadas para o ensaio de flexão estática foram ensaiadas a propagação de ondas de excitação e ultrassônicas. A partir dos ensaios foi possível estimar seus valores de módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}).

O ensaio de excitação por impulso seguiu a norma ASTM E1876-22, e o equipamento Sonelastic. Com base nos ensaios é possível estimar os módulos elásticos a partir das frequências naturais de vibração do corpo de prova (CP). As frequências são geradas manualmente, e a resposta acústica é captada por um sensor acústico. Em seguida, o software calcula os módulos elásticos dinâmicos com base nos dados coletados. As amostras possuem dimensões de 30 mm x 6 mm x 170 mm (largura, espessura e comprimento). Foram utilizados 13 corpos de prova (CPs) por tratamento. Os CPs foram marcados com traços a uma distância de $0,224L$ de cada extremidade, sendo L o comprimento total do CP. Este ensaio foi realizado no modo de excitação flexional, permitindo a avaliação dinâmica do material

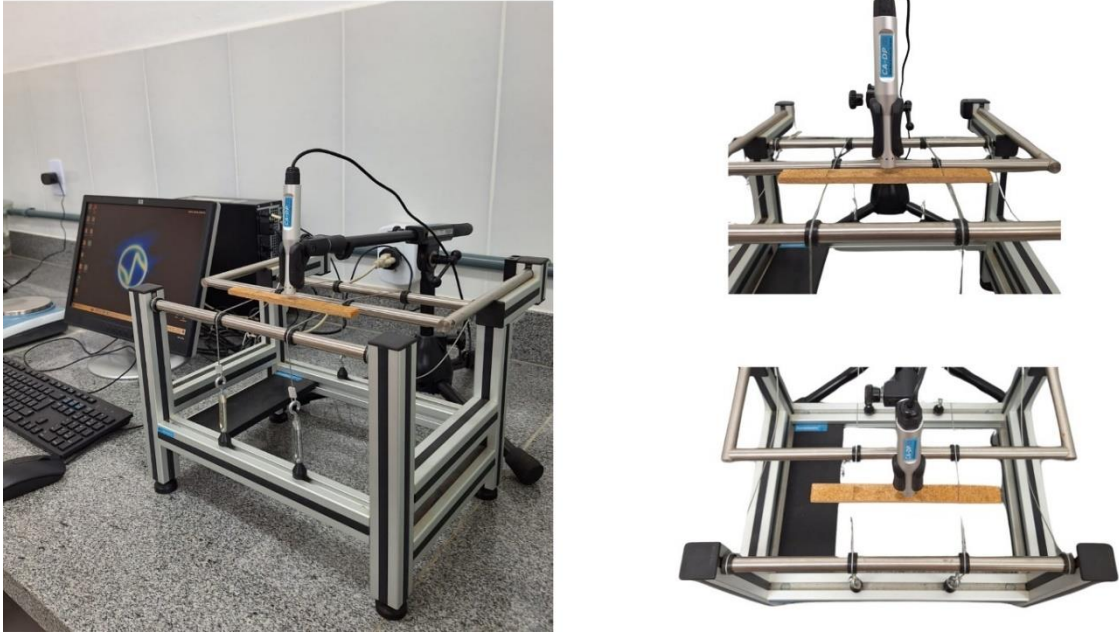


Figura 3 - Ensaio: (a) Equipamento Sonelastic; (b) Realização do ensaio de propagação de ondas de excitação flexional.

Fonte: Próprio autor

Já para os ensaios ultrassônicos (Figura 4), foi utilizado o equipamento FAKOPP Ultrasonic Timer com dois transdutores (SD 33) piezoelétricos de frequência de 90kHz (Figura 8), seguindo a norma ASTM E494-15. Foram utilizados 13 corpos de provas com dimensões de 30 mm x 6 mm x 170 mm (largura, espessura e comprimento).

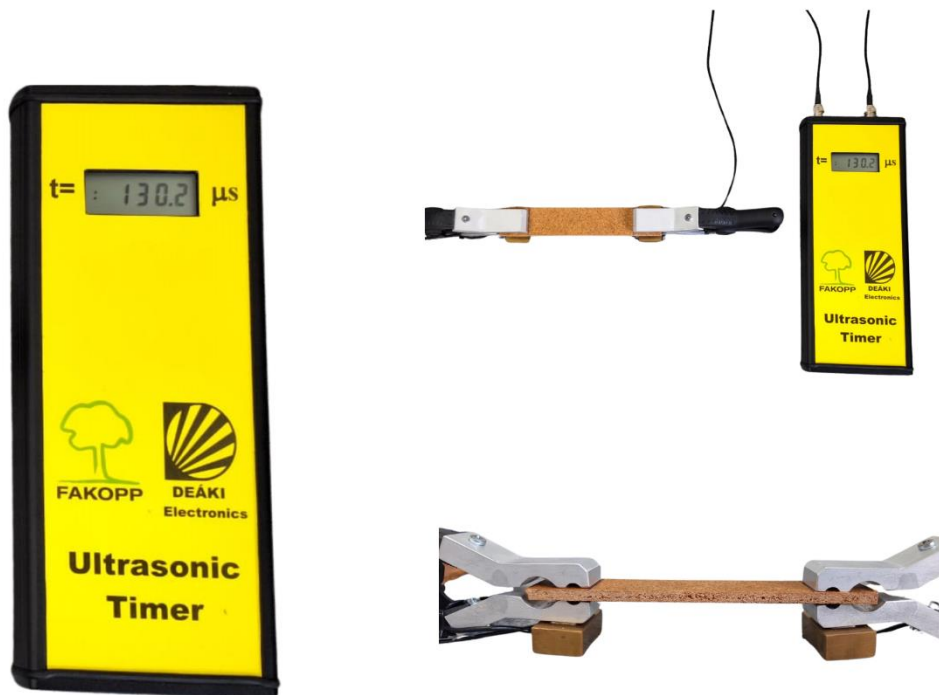


Figura 4 – (a) Equipamento Ultrasonic Timer FAKOPP; (b) Realização do ensaio de propagação de ondas.

Fonte: Próprio autor

O pulso gerado pelo transdutor passa pela amostra até ser captada pelo transdutor receptor, e assim determinar o tempo de passagem. Conhecido o tempo e a distância percorrida é possível determinar a velocidade de propagação da onda, conforme a fórmula 1:

$$V = \frac{d}{t} \quad (1)$$

Onde:

V = velocidade de propagação da onda (m/s²)

d = distância (m/s)

t = tempo (s)

O tempo de percurso t foi subtraído por 37 μs como fator de correção para compensar o tempo de trânsito do transdutor dentro das sondas de partida e recepção, conforme recomendação do equipamento. Para determinar o módulo de elasticidade dinâmico, foi utilizada a fórmula 2:

$$Edin = (V^2 \cdot \rho) \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

Onde:

V = velocidade (m/s)

ρ = densidade (kg/m³)

E = módulo de elasticidade dinâmico (MPa)

3 RESULTADO E DISCUSSÕES

3.1. Ensaio Mecânicos

O Quadro a seguir apresenta os valores médios dos ensaios mecânicos de tração, compressão paralela, flexão estática (MOE e MOR) e impacto de Charpy, realizados nos compósitos plástico-madeira com granulometrias de 35 mesh e 60 mesh. São indicados os valores médios, os desvios padrão e os agrupamentos estatísticos. O teste de Tukey ($p > 0,05$) foi aplicado para identificar diferenças significativas: médias que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes, considerando o Agrupamento 1 (médias entre os tratamentos) e o Agrupamento 2 (comparação das medias entre as granulometrias).

Quadro 1 - Resultados dos Ensaio Mecânicos dos compósitos plásticos madeira para diferentes tratamentos e granulometrias.

Ensaio Mecânicos	Granulometria Tratamentos	35 MESH			60 MESH		
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
Tração	Tensão (MPa)	6,686	9,129	7,533	6,196	9,022	5,768
	Desvio Padrão	1,736	1,961	1,185	1,263	1,682	1,607
	Agrupamento 1	B	A	AB	B	A	B
	Agrupamento 2	A			A		
Compressão	CP (MPa)	13,551	18,784	17,073	12,116	17,65	13,248
	Desvio Padrão	2,645	2,258	3,191	3,045	4,88	2,371
	Agrupamento 1	BC	A	AB	C	A	BC
	Agrupamento 2	A			B		
Flexão estática	MOE (MPa)	3012	3120	2545	2198	2921	1471,1
	Desvio Padrão	991	790	381	946	840	69,1
	Agrupamento 1	AB	A	ABC	BC	AB	C
	Agrupamento 2	A			B		
	MOR (MPa)	14,39	16,60	13,811	8,49	13,90	10,56
	Desvio Padão	6,43	6,88	1,60	3,72	6,22	1,34
	Agrupamento 1	A	A	AB	B	AB	AB
	Agrupamento 2	A			B		
Impacto de Charpy	Força (kJ/m ²)	7,523	11,46	10,32	10,89	11,524	11,449
	Desvio Padão	0,715	6,45	3,47	3,84	3,125	2,184
	Agrupamento 1	A	A	A	A	A	A
	Agrupamento 2	A			A		

Observa-se que os valores médios de tensão à tração para 35 mesh foram maiores do que os obtidos para 60 mesh. Os maiores valores foram registrados nos tratamentos com 60% de resíduos de madeira (T2 e T5) em ambas as granulometrias, com destaque para T2 (9,129 MPa). Os demais tratamentos não diferem significativamente entre si, exceto pelo T3 (35 mesh), que apresentou um valor intermediário (7,53 MPa), não havendo diferença estatística com T2, T5 e os tratamentos com 70% de resíduos (T1 e T4). Houve diferença estatística significativa entre as granulometrias, conforme indicado no agrupamento 2, evidenciando que os tratamentos em 35 mesh apresentaram melhores resultados em relação a 60 mesh

O tratamento T5 apresentou uma tensão apenas 1,17% menor que o T2, ambos com valores elevados e consistentes, destacando-se como os mais eficientes. Em contraste, o tratamento T3 teve uma redução de 17,48% na tensão em relação ao T2, sendo o tratamento com o menor valor de tensão, mas ainda manteve um desempenho satisfatório, indicando que sua formulação garante uma boa capacidade de resistência.

Estudos de Xu et al. (2023) indicam que fibras de madeira menores (malha 80–120) apresentam propriedades de tração inferiores devido à menor transferência de tensão entre a matriz e as fibras. Essa tendência é observada nos tratamentos com granulometria 60 mesh, que apresentaram desempenho inferior em comparação aos tratamentos com granulometria 35 mesh, que favorecem uma melhor distribuição da tensão. Fibras de tamanho moderado (malha 20–40) são mais eficientes na transferência de esforços, o que pode explicar os melhores resultados obtidos nos tratamentos 35 mesh.

A pesquisa de Nukala et al. (2022), que investigou compósitos de polipropileno reciclado (rPP) com serragem de madeira (SM) em diferentes proporções, revelou um aumento contínuo na resistência à tração à medida que a quantidade de serragem de madeira aumentava, atingindo um valor máximo de 31 MPa (40% SM e 60% rPP). Isso reflete uma tendência positiva da incorporação de resíduos na matriz polimérica, onde os melhores valores de tensão à tração foram obtidos nos tratamentos com 60% de resíduos de madeira (T2 e T5).

Os resultados deste estudo indicaram que os tratamentos T2 e T5 apresentaram tensões à tração significativamente superiores entre os avaliados. Em contrapartida, os dados relatados por Agnes et al. (2020) mostraram valores de resistência à tração próximos entre as granulometrias testadas. Essa diferença de comportamento,

especialmente em relação ao efeito da granulometria na resistência mecânica, destaca a influência das características específicas da formulação utilizada neste trabalho.

Os valores médios de compressão paralela para a granulometria de 35 mesh foram superiores aos obtidos para 60 mesh. O tratamento T2 (18,784 MPa) para 35 mesh apresentou o maior valor, seguido por T3 (17,073 MPa). Por outro lado, os menores valores foram observados nos tratamentos T4 (12,116 MPa) e T6 (13,248 MPa) para 60 mesh. O tratamento T5, embora tenha demonstrado desempenho próximo ao de T2, diferiu estatisticamente dos demais tratamentos, indicando uma distinção significativa em suas propriedades mecânicas. Houve diferença estatística significativa entre as granulometrias, conforme indicado no agrupamento 2, destacando o melhor desempenho dos tratamentos em 35 mesh em relação aos de 60 mesh.

Partículas menores tendem a integrar-se melhor à matriz polimérica. Contudo, o controle da granulometria é essencial, pois partículas excessivamente finas podem comprometer a homogeneidade do compósito e reduzir a eficiência na transferência de carga (ÇAVUS et al., 2020). No caso do presente estudo, observou-se que a granulometria muito fina não se integrou de forma ideal à matriz polimérica, resultando em valores mecânicos menores. Estatisticamente, os tratamentos com granulometria fina não foram semelhantes aos tratamentos com granulometria mais grossa, refletindo a influência tanto do percentual de resíduos quanto da granulometria na resistência mecânica dos compósitos.

Aliev et al. (2024) incorporaram na matriz PVC + CaCO₃ e reforços de *Poplar tree* e *Paulownia tree*, observando um comportamento semelhante ao deste estudo, com valores variando de 17 MPa a 21 MPa. Em outro estudo de Lopez et al. (2020), com 50% de eucalipto e 10% de PEAD, 10% de PEBD, 10% de PP, 10% de PET e 10% de aditivo, obteve-se um valor de 130,31 MPa, cerca de 6 vezes maior do que o valor máximo obtido neste estudo. Isso evidencia que a utilização de diferentes matrizes poliméricas pode interferir significativamente nos resultados mecânicos. Ademais, estudos indicam que compósitos plásticos-madeira feitos com poliestireno (PS) e polipropileno (PP) apresentam propriedades mecânicas superiores (JIAN et al., 2022). Os maiores valores de módulo de elasticidade (MOE) foram registrados nos tratamentos com 35 mesh, com destaque para T2 (3120 MPa). Para a granulometria de 60 mesh, o maior valor de MOE foi observado no tratamento T5 (2921 MPa), que

não apresentou diferença estatística significativa em relação aos tratamentos T1 e T2. Por outro lado, o tratamento T6 (1471,1 MPa) registrou o menor valor, diferenciando-se estatisticamente de todos os demais tratamentos. A diferença estatística entre as granulometrias, conforme indicado no Agrupamento 2, confirma que os tratamentos em 35 mesh apresentaram maior eficiência do que aqueles em 60 mesh.

Os maiores valores de módulo de ruptura (MOR) foram observados nos tratamentos T2 (16,60 MPa) e T5 (13,90 MPa), ambos com 60% de resíduos. Os menores valores foram encontrados para T4 (8,49 MPa), enquanto T1, T3 e T6 apresentaram valores intermediários que não diferiram estatisticamente entre si. Foi identificada diferença estatística significativa entre as granulometrias, conforme agrupamento 2, evidenciando o melhor desempenho dos tratamentos de 35 mesh em relação aos de 60 mesh.

Conforme os resultados estatísticos entre as granulometrias, os compósitos de 35 mesh apresentaram desempenho superior em comparação aos de 60 mesh. Essa eficiência é atribuída à boa homogeneização dos resíduos com a matriz polimérica durante o processo de termo prensagem. Ou seja, o material demonstrou menos falhas no acoplamento e maior facilidade de manuseio durante a produção. Os valores seguem um padrão semelhante para ambas as granulometrias, mas não há relação direta entre concentração e desempenho. A concentração intermediária (60% RE e 40% PVA) apresentou os melhores resultados, seguida por 70% RE e 30% PVA, enquanto 40% RE e 60% PVA teve os menores valores

Pesquisas recentes justificam o comportamento observado, onde valores de MOE são maiores em compósitos com maior quantidade de resíduos de madeira. Nukala et al. (2022) revelou que compósitos contendo maior proporção de resíduos de madeira apresentaram aumento no módulo de elasticidade devido à boa interface entre os componentes e à rigidez adicional fornecida pelos resíduos, desde que bem distribuídos na matriz polimérica.

Koffi et al. (2021) observaram que o aumento na fração de fibra de madeira em compósitos de polietileno de alta densidade promoveu um crescimento linear no módulo de elasticidade, o que sugere que a rigidez do material está diretamente relacionada à maior presença da fase reforçante. De forma semelhante, no presente estudo, os tratamentos com maior proporção de resíduos de madeira também apresentaram os maiores valores de MOE, como observado em T2 e T5. Isso evidencia que o aumento da fração de reforço tende a melhorar a rigidez dos

compósitos, independentemente da matriz utilizada, reforçando o papel estrutural das partículas lignocelulósicas no comportamento mecânico do material.

Os resultados obtidos no estudo de Jian et al. (2022) destacam que as propriedades de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) variam amplamente em função do tipo de madeira, matriz polimérica e concentração de fibra.

No presente estudo, os valores máximos de MOR (16,60 MPa) e MOE (3120 MPa) foram obtidos para o Tratamento T2, composto por 60% de resíduo de eucalipto e 40% de PVA, destacando-se como o mais eficiente entre os tratamentos avaliados. Ainda que inferiores aos de Jian et al. (2022) em sistemas com ácido polilático (PLA) ou polipropileno (PP), os resultados reforçam o potencial do resíduo de madeira associado ao PVA para aplicações específicas, sobretudo considerando a matriz mais sustentável empregada neste estudo. Comparativamente, os menores desempenhos observados em T4 e T6 indicam que granulometrias menores e proporções inadequadas podem impactar negativamente na transferência de tensões e na integridade estrutural dos compósitos.

Os valores médios de impacto de Charpy foram semelhantes para ambas as granulometrias, sem diferença estatística significativa entre elas. O maior valor foi registrado em T5 (11,52 kJ/m²), enquanto o menor foi observado em T1 (7,523 kJ/m²). No entanto, todos os tratamentos apresentaram desempenho estatisticamente semelhante dentro do agrupamento 1, independentemente da granulometria. Assim, a granulometria não afetou os resultados obtidos nesse ensaio, conforme o agrupamento 2.

Os tratamentos T1, T2 e T3, que utilizaram a granulometria de 35 mesh, apresentaram valores médios de força de impacto mais baixos quando comparados aos tratamentos T4, T5 e T6, com granulometria de 60 mesh. Esses resultados indicam que, apesar da resistência ao impacto depender da matriz e das características das partículas, como sugerido por Mital'ová et al. (2024), no presente estudo essas variáveis não apresentaram efeito significativo sobre o desempenho dos compósitos.

No estudo de Várdai et al. (2021), a adição de fibras de PET a compósitos de polipropileno e fibras naturais de madeira aumentou a resistência ao impacto, variando de 8,5 kJ/m² a 11,2 kJ/m². De forma semelhante, a combinação de resíduos de madeira com PVA no presente estudo proporcionou um desempenho superior, especialmente nos tratamentos T3 e T4, que apresentaram valores mais elevados de resistência ao impacto. Esses resultados indicam que o uso de resíduos de madeira

com PVA pode ser uma alternativa promissora para melhorar a resistência ao impacto em compósitos plásticos madeira.

Os resultados obtidos para resistência ao arrancamento estão apresentados nas Figuras 5, os compósitos plástico-madeira são influenciados significativamente pelas condições de umidade relativa (UR) e pelas características dos tratamentos, como a concentração de resíduo. Observa-se que, de forma geral, os valores da resistência ao arrancamento são maiores no lote submetido a 20°C e 65% UR, quando comparados ao lote a 20°C e 85% UR. Isso evidencia que a maior umidade relativa reduz a resistência dos compósitos, devido à interação da água com o material, que pode enfraquecer a matriz polimérica (PVA), que é solúvel em água (BERCEA, 2024), e às interações com os resíduos de madeira, prejudicando a transferência de esforços.

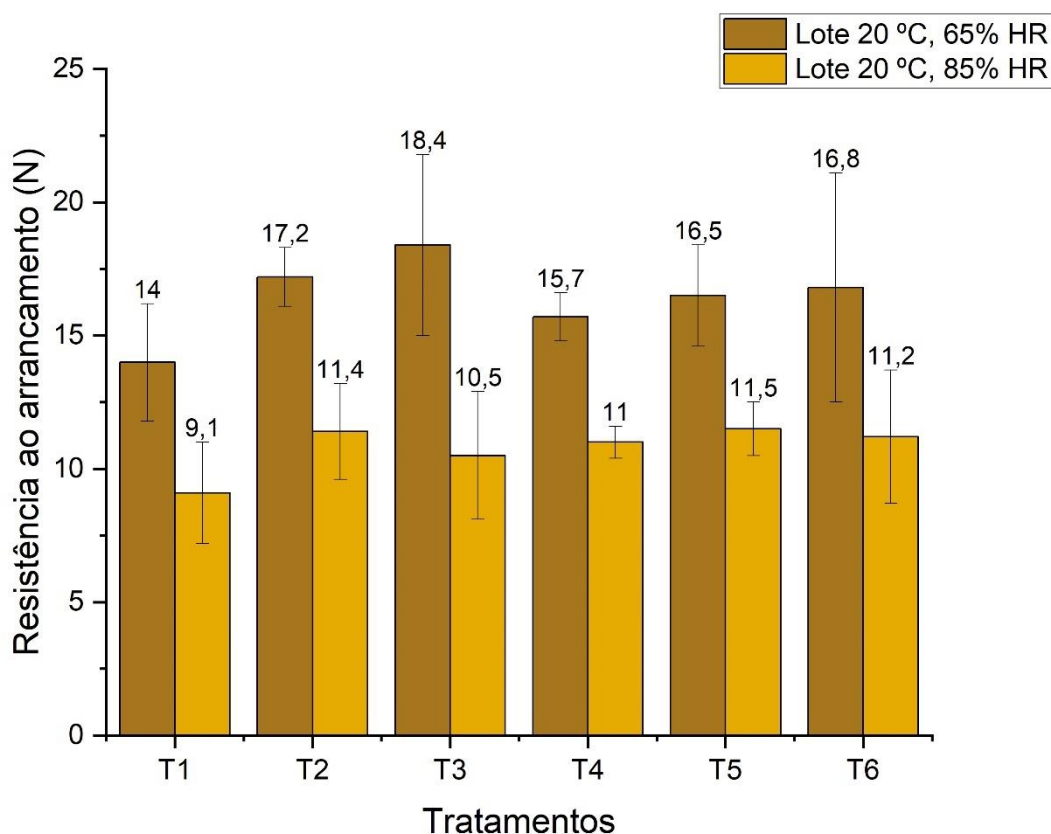


Figura 5 - Valores médios da Resistência ao arrancamento para os dois lotes.

Fonte: Próprio autor

Os tratamentos T3 e T2 apresentem os maiores valores absolutos no lote de 65% U.R. a análise da redução percentual entre os lotes de 65% e 85% U.R. indica maior consistência em outros tratamentos, como T4 e T5, que exibem uma redução

percentual menor. Por exemplo, o tratamento T4 apresentou uma redução de apenas 29,9%, enquanto T3 e T2 mostraram reduções superiores a 40%. Esses dados evidenciam que a composição do compósito e a interação com a umidade têm influência direta sobre a resistência ao arrancamento.

Os compósitos com maior proporção de PVA, apresentaram os melhores valores absolutos de resistência ao arrancamento em ambas as condições de umidade relativa (65% e 85% UR). No entanto, esses tratamentos também mostraram uma redução percentual mais significativa na resistência ao aumentar a umidade, indicando maior sensibilidade às variações de UR.

De maneira geral, os tratamentos T1 e T4 se destacaram pelo melhor desempenho de resistência ao arrancamento. Ambos apresentaram maior estabilidade nas variações de umidade, com as menores reduções percentuais entre os lotes de 65% e 85% de umidade relativa. Tal desempenho pode ser atribuído à sua composição, composta por 70% de resíduos e 30% de PVA, que resulta em uma menor quantidade de PVA, proporcionando maior resistência e estabilidade em diferentes condições ambientais.

Durmaz (2022) observaram que o aumento da quantidade de partículas lignocelulósicas em compósitos de HDPE compromete a resistência ao arrancamento de parafusos, comportamento atribuído à menor coesão da matriz. De maneira semelhante, no presente estudo, verificou-se que tratamentos com maior proporção de matriz apresentaram melhor desempenho nesse ensaio, indicando que uma maior quantidade de fase polimérica favorece a ancoragem e a distribuição dos esforços aplicados, contribuindo para a integridade da fixação mecânica.

3.2. Ensaio de propagação de ondas

O quadro a seguir apresenta os valores médios dos ensaios de propagação de ondas realizados nos compósitos plástico-madeira com granulometrias de 35 mesh e 60 mesh. São apresentados os valores médios, os desvios padrão e os agrupamentos estatísticos. O teste de Tukey ($p > 0,05$) foi utilizado para identificar diferenças significativas: médias que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes, levando em consideração o Agrupamento 1 (médias entre os tratamentos) e o Agrupamento 2 (comparação entre as granulometrias).

Quadro 2 - Resultados dos ensaios de propagação de ondas dos compósitos plásticos madeira para diferentes tratamentos e granulometrias.

Ensaio de propagação de ondas	Granulometria	35 MESH			60 MESH		
	Tratamentos	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Excitação por impulso	Edin (MPa)	4045	4139	3650	2992	3965	2444,6
	Desvio Padrão	1118	1199	571	1404	1264	136,3
	Agrupamento 1	A	A	A	AB	A	B
	Agrupamento 2	A			B		
Propagação de ondas ultrassônicas	Edin (MPa)	2666,2	2985	2210,1	2758,1	2803,4	1803,6
	Desvio Padrão	213,5	337	175,1	223,7	272,1	134,5
	Agrupamento 1	A	A	B	A	A	C
	Agrupamento 2	A			A		

Os valores médios de excitação por impulso foram superiores para a granulometria de 35 mesh em comparação com 60 mesh. Os tratamentos com 60% de resíduos de madeira (T2 e T5) apresentaram os maiores valores, destacando-se T2 (4139 MPa), resultado consistente com os dados estáticos. Os demais tratamentos não apresentaram diferenças significativas entre si, exceto pelo tratamento T3 (35 mesh), que obteve um valor intermediário (3650 MPa), sem diferença estatística em relação a T1, T2 e T5, mas com diferença em relação a T4 e T6. O tratamento T6 foi o único a se diferenciar com o agrupamento B. Houve diferença estatística significativa entre as granulometrias, com melhores resultados para a granulometria de 35 mesh, conforme indicado no agrupamento 2.

Foi observado que granulometrias menores, associadas à baixa concentração de PVA, não se integravam adequadamente, enquanto maiores concentrações de PVA favoreceram uma melhor coesão das placas.

Li et al (2017) investigou a relação entre o módulo de elasticidade dinâmico (MOE dinâmico) e o estático (MOE estático) em painéis compostos de serragem e casca de tangerina. Os resultados mostraram que o MOE dinâmico foi consistentemente maior que o estático, com correlação linear forte ($R^2 = 0,9455$). Com base nos dados apresentados, o módulo de elasticidade dinâmico (MOE dinâmico) é sempre superior ao módulo de elasticidade estático (MOE estático), conforme relatado por Bucur (2006).

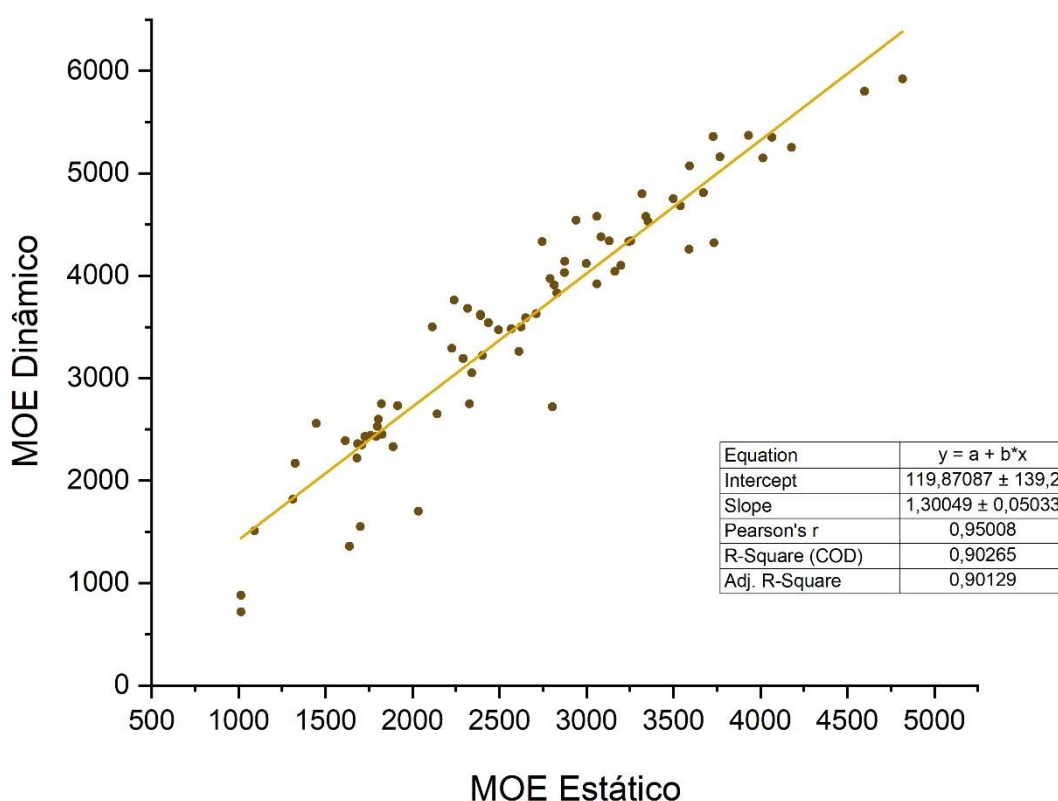


Figura 6 - Análise de Regressão Linear entre excitação por impulso e flexão estática: (MOE Dinâmico x MOE Estático)

A regressão linear realizada entre o módulo de elasticidade dinâmico (MOE Dinâmico), obtido por excitação por impulso, e o módulo de elasticidade estático (MOE Estático), avaliado por flexão estática, revela uma relação significativa entre as duas variáveis (Figura 6). Com um coeficiente de correlação de Pearson ($r=0,95008$), observa-se uma forte associação positiva, indicando que o método não destrutivo é altamente confiável para prever os resultados do módulo de elasticidade.

Além disso, o coeficiente de determinação ($R^2=0,90$) confirma que 90% da variação do MOE dinâmico pode ser explicada pela variação no MOE Estático, destacando a precisão do modelo. Esses resultados reforçam a eficácia de métodos baseados em excitação por impulso como alternativa não destrutiva para caracterização mecânica de compósitos plástico-madeira, especialmente em contextos onde a preservação das amostras é essencial.

No ensaio de propagação de ondas ultrassônicas, os valores médios também foram superiores para a granulometria de 35 mesh, mas não houve diferença estatística

significativa entre as granulometrias, conforme indicado no agrupamento 2. Os tratamentos T2 e T5 apresentaram os maiores valores. Os demais tratamentos não apresentaram diferenças significativas entre si, exceto T3 (35 mesh), que obteve o valor mais baixo (2210 MPa), e T6 (60 mesh), com o menor valor (1803,6 MPa).

Nos compósitos de *Eucalyptus* sp. e PVA, aqueles com maiores concentrações de resíduos apresentaram maiores valores de MOE, destacando a influência da flexibilidade do PVA na redução da rigidez do material.

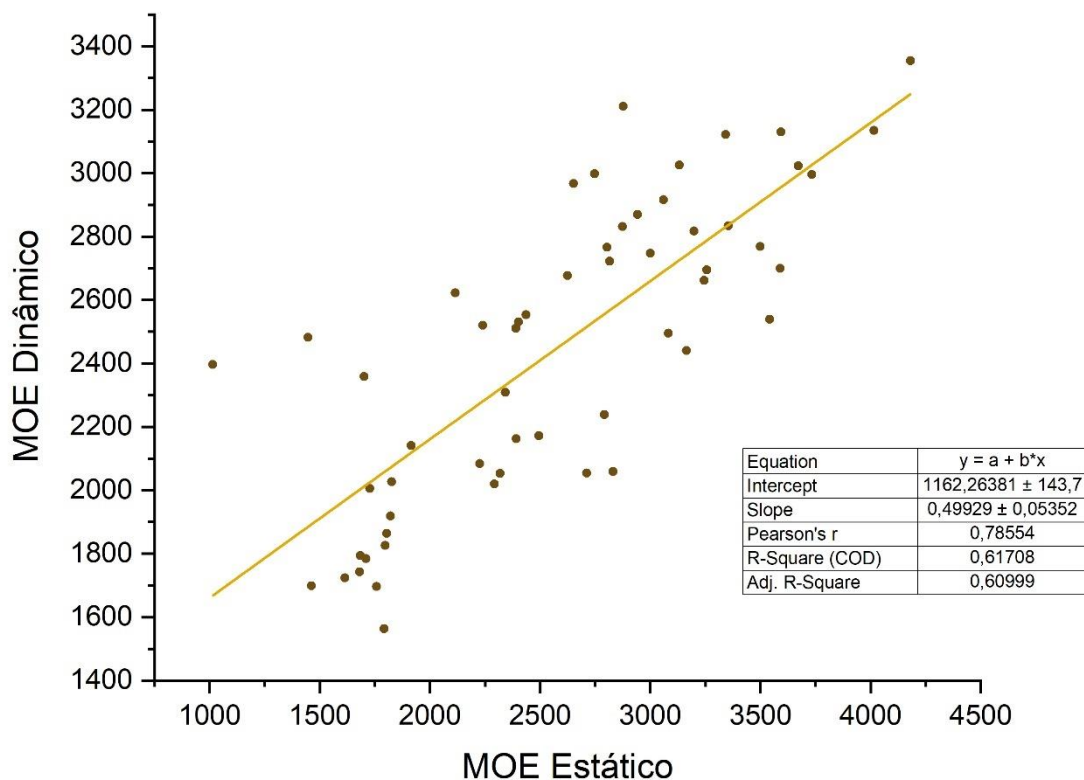


Figura 7 - Análise de Regressão Linear entre propagação de ondas ultrassônicas e flexão estática: MOE Dinâmico x MOE Estático

O gráfico apresentado mostra uma regressão linear entre o módulo de elasticidade dinâmico (MOE Dinâmico), obtido por ensaio de propagação de ondas ultrassônicas, e o Módulo de Elasticidade Estático (MOE Estático), obtido por ensaio de flexão (Figura 7). O coeficiente de correlação de Pearson foi de 0,78, indicando uma correlação moderada a forte entre as variáveis, enquanto o R-quadrado ajustado explica aproximadamente 61% da variação no MOE Dinâmico em função do MOE Estático. Mostrando que, o ensaio de propagação de ondas ultrassônicas sofre mais

influência dos aspectos da qualidade do compósito, que os ensaios de propagação de ondas de excitação.

O estudo de Karmarkar et al. (2018) demonstrou que o uso de extrusora e HDPE como matriz polimérica resultou em compósitos reforçados com fibras naturais que apresentaram elevados valores de módulo de elasticidade dinâmico (DMoE) e estático. As correlações entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático para os compósitos de HDPE com fibras naturais apresentaram R^2 de 0,95, indicando forte relação linear entre os dois parâmetros. Esse desempenho superior está relacionado à eficiência do processo de extrusão, que promove uma boa dispersão das fibras e uma interface matriz-reforço otimizada, além das propriedades do HDPE, que contribuem para maior rigidez e estabilidade. No entanto, não apenas a metodologia de preparo das fibras e a escolha do adesivo influenciam o processo, mas também as condições de preparação das amostras. Esses fatores afetam diretamente a integração das fibras na matriz e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas, refletindo nas correlações observadas entre o módulo de elasticidade. Em contrapartida, o presente estudo utilizou o processo de termoprensagem com resíduos de *Eucalyptus* sp. e PVA, o que resultou em uma relação dinâmica-estática moderada. Isso pode ser atribuído à menor eficiência na integração das partículas ao PVA durante a termoprensagem, o que pode comprometer o desempenho mecânico e acústico final dos compósitos e por conseqüência na passagem de propagação da onda.

A dispersão dos pontos e os desvios padrão mostram variação considerável entre os dois métodos, o que compromete a confiabilidade do ensaio de propagação de ondas de ultrassom para substituir o ensaio de flexão na caracterização precisa do MOE em compósito madeira e PVA. Essa discrepância pode ser atribuída à heterogeneidade do material, como densidade e porosidade, além de ser isotrópico.

4 CONCLUSÃO

Os resultados dos ensaios mecânicos de tração, compressão paralela e flexão estática demonstraram que os tratamentos T2 e T5 (60% RE e 40% de PVA) apresentaram os maiores valores médios de resistência mecânica, destacando-se como os mais eficientes para aplicações que demandam alta resistência e elasticidade. Em relação à influência da granulometria, conclui-se que os compósitos com granulometria de 35 mesh tiveram desempenho superior em comparação aos de 60 mesh, evidenciando que partículas maiores favorecem a transferência de tensões e a homogeneização dos compósitos, resultando em melhores propriedades mecânicas.

Nos ensaios de impacto de Charpy, não houve diferença significativa entre os tratamentos, com desempenho semelhante observado para todas as amostras, independentemente da granulometria. Além disso, a maior resistência à força de arrancamento foi observada em condições de menor umidade relativa (65%), com os tratamentos T1 e T4 (70% de resíduos e 30% de PVA) apresentando maior estabilidade e menor redução percentual nas propriedades mecânicas em diferentes condições de umidade.

Nos ensaios de propagação de ondas, o método de excitação por impulso apresentou uma forte correlação linear com os ensaios estáticos de módulo de elasticidade (MOE), destacando-se como uma ferramenta eficaz e não destrutiva para avaliar a integridade dos compósitos. Por outro lado, o ensaio de propagação de ondas ultrassônicas não apresentou a mesma confiabilidade, possivelmente devido à heterogeneidade do material e à influência de fatores como densidade e porosidade.

Esses resultados evidenciam que a formulação dos compósitos, incluindo a proporção de resíduo e a granulometria, são determinantes para suas propriedades mecânicas e elásticas, com os tratamentos T2 e T5 se destacando como os maiores valores e por consequência mais adequados para a produção de compósitos plástico-madeira.

REFERÊNCIA

AGNES, E. A.; HILLIG, E. **Physical-mechanical properties of polymer-fiber composites produced by pressed molding**. Research, Society and Development, v. 9, n. 8, e29985063, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5063>

ALIEV, S.; ZIYAMUHAMMEDOV, D.; JURAEV, A. **Investigate on the physical and mechanical properties of wood-polymer composition materials made on the premise of neighborhood wood flours**. E3S Web of Conferences, v. 477, 00056, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447700056>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6108-19: Standard Test Method for Compressive Properties of Plastic Lumber and Shapes**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638-22: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D790-17: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6110-18: Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1876-22: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and**

Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E494-15: Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.

ARAUJO, V. A.; GARCIA, J. N.; GAVA, M.; BARBOSA, J. C.; SAVI, A. F.; MORALES, E. A. M.; VASCONCELOS, J. S. **Wood Waste Generation of Wooden-Houses Manufacturers in the Brazilian State of Santa Catarina.** In: **Connecting People and Ideas.** Proceedings of EURO ELECS 2015. Guimarães, Portugal, 2015. ISBN 978-989-96543-8-9.

BUCUR, V. **Acoustics of Wood.** 2. ed. Berlin: Springer, 2006.

CATANOSO, Justin. **Timber harvests to meet global wood demand will bring soaring emissions: Study.** Mongabay. Bioenergy, 2023. Disponível em: <https://news.mongabay.com/2023/07/timber-harvests-to-meet-global-wood-demand-will-bring-soaring-emissions-study/>. Acesso em: 10 de julho de 2024.

CAVALCANTI, W. M.; FERNANDES, M. A. **Produção de Materiais Compósitos a Base de Resíduos Lignocelulósicos: Inovações Recentes, Técnicas e Potenciais Aplicações.** Editpa-Atppin, 2021. DOI: 10.36599/editpa-atppin.005.

DURMAZ, Sefa. **Effect of wood flour content on the properties of flat pressed wood plastic composites.** Wood Research, v. 67, n. 2, p. 302-310, 2022. DOI: <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/67.2.302310>

ELTEK. **Physical Properties.** 2024. Disponível em: <https://elteklabs.com/test-capabilities/material-tests/physical-properties/>. Acesso em: 14 de julho de 2024.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14592:2008+A1:2012: Timber structures - Dowel-type fasteners - Requirements**. Brussels: CEN, 2012.

GWMI, Global Wood Markets Info. **Global demand for timber could grow fourfold by 2050**. 2022. Disponível em: <https://www.globalwoodmarketsinfo.com/global-demand-timber-grow-fourfold-2050/>. Acesso em: 10 de julho de 2024.

JIAN, B.; MOHRMANN, S.; KI, H.; LI, Y.; ASHRAF, M.; ZHOU, J.; ZHENG, X. **A Review on Flexural Properties of Wood-Plastic Composites**. *Polymers*, v. 14, n. 19, 3942, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14193942>

KARMARKAR, S.; SHASHIDHAR, G. M.; CHAUHAN, S. **A comparative study of dynamic and static modulus of elasticity of natural fiber reinforced HDPE composites**. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, v. 15, n. 1, p. 80-86, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13196-018-0211-8>

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

LI, C. Y.; KANG, C. W.; KANG, H. Y. et al. **Relation between the dynamic modulus of elasticity and the static modulus of elasticity, the modulus of rupture of mandarin peel-sawdust composite board**. *Journal of Wood Science*, v. 63, p. 658-661, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1655-y>

MITAL'OVÁ, Z.; MITAL, D.; BERLADIR, K. **A Concise Review of the Components and Properties of Wood-Plastic Composites**. *Polymers*, v. 16, n. 11, 1556, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16111556>

NUKALA, S. G.; KONG, I.; KAKARLA, A. B.; TSHAI, K. Y. **Preparation and Characterisation of Wood Polymer Composites Using Sustainable Raw Materials**. *Polymers*, v. 14, n. 15, 3183, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14153183>

NUKALA, S. G.; KONG, I.; KAKARLA, A. B.; KONG, W.; KONG, W. **Development of Wood Polymer Composites from Recycled Wood and Plastic Waste: Thermal and Mechanical Properties**. *Journal of Composites Science*, v. 6, n. 7, 194, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs6070194>

PANDEY, S. **Wood waste utilization and associated product development from under-utilized low-quality wood and its prospects in Nepal**. *SN Applied Sciences*, v. 4, 168, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05061-5>

VÁRDAI, R.; LUMMERSTORFER, T.; PRETSCHUH, C.; JERABECK, M.; GAHLEITNER, M.; BARTOS, A.; MÓCZÓ, J.; ANGGONO, J.; PUKÁNSZKY, B. **Improvement of the impact resistance of natural fiber-reinforced polypropylene composites through hybridization**. *Polymer Advanced Technologies*, 2021. DOI: 10.1002/pat.5280

XU, H.; YANG, Y.; LI, L.; LIU, B.; FU, X.; YANG, X.; CAO, Y. **Mechanical Properties Variation in Wood—Plastic Composites with a Mixed Wood Fiber Size**. *Materials*, v. 16, n. 17, 5801, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16175801>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou a influência das proporções de resíduos de *Eucalyptus sp.* (RE) e PVA, bem como da granulometria, nas propriedades físico-mecânicas, estruturais e químicas dos compósitos plástico-madeira. A proporção intermediária (60% RE e 40% PVA) mostrou-se a mais eficiente, com os tratamentos T2 e T5 apresentando os melhores resultados em resistência à tração, compressão e flexão estática. A granulometria de 35 mesh demonstrou superioridade em relação à de 60 mesh, favorecendo a homogeneidade e a transferência de tensões.

Nos ensaios de impacto de Charpy, não houve diferenças significativas entre os tratamentos, indicando que a resistência ao impacto é menos sensível às variações de composição e granulometria. Já nos ensaios de arrancamento de parafuso, os tratamentos T1 e T4 (70% RE e 30% PVA) destacaram-se pelas menores reduções percentuais entre os lotes de 65% e 85% de umidade relativa. O método de excitação por impulso foi eficaz para estimar o módulo de elasticidade (MOE), enquanto as ondas ultrassônicas tiveram limitações devido à heterogeneidade do material.

As análises estruturais e químicas, confirmaram que o aumento do teor de RE elevou a cristalinidade e a estabilidade térmica dos compósitos. Já o PVA contribuiu para uma estrutura menos organizada, aumentando a flexibilidade e melhorando a adesão entre os componentes. A caracterização morfológica evidenciou que maiores teores de PVA resultaram em interfaces mais coesas e homogêneas, reduzindo falhas e espaços vazios.

A densidade aparente foi influenciada pela proporção de RE e PVA, com os tratamentos T2 e T5 apresentando a melhor opção entre os tratamentos. A estabilidade dimensional foi melhor em tratamentos com maior teor de PVA, que reduziram o inchamento e a variação dimensional em condições de umidade.

Em síntese, os compósitos com 60% RE e 40% PVA, especialmente com granulometria de 35 mesh, demonstraram potencial para aplicações industriais sustentáveis, como painéis e revestimentos. Este trabalho contribui para o desenvolvimento de materiais compósitos, destacando a importância da proporção de componentes e da granulometria no desempenho final do material.