

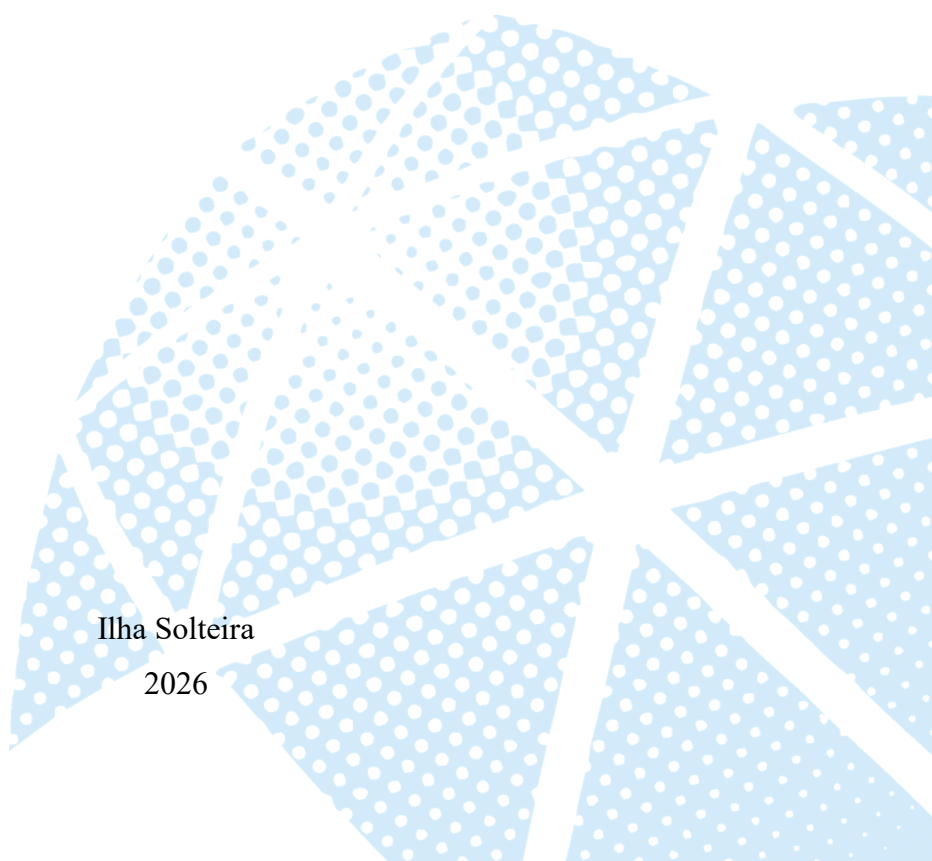
**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

PEDRO MANOEL DA SILVA NETO

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS
DE PAINÉIS AGLOMERADOS DE MADEIRA E PLÁSTICO**

Ilha Solteira

2026



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PEDRO MANOEL DA SILVA NETO

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS
DE PAINÉIS AGLOMERADOS COMPÓSITOS DE MADEIRA E PLÁSTICO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Especialidade: Estruturas.

Prof. Dr. Sergio Augusto Mello da Silva

Orientador

Prof. M.Sc. Matheus Viana de Souza

Coorientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

S586i Silva Neto, Pedro Manoel da.
Influência da temperatura nas propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados de madeira e plástico / Pedro Manoel da Silva Neto. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
100 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2026

Orientador: Sergio Augusto Mello da Silva
Coorientador: Matheus Viana de Souza
Inclui bibliografia

1. Compósitos madeira-plástico. 2. Variação de temperatura em painéis de madeira. 3. Resistência a umidade.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE PAINÉIS AGLOMERADOS DE MADEIRA E PLÁSTICO

AUTOR: PEDRO MANOEL DA SILVA NETO

ORIENTADOR: SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA
COORIENTADOR: MATHEUS VIANA DE SOUZA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, área: Engenharia de Construção Civil pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA**
Data: 13/04/2026 14:51:39-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

Documento assinado digitalmente
 **ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO**
Data: 13/04/2026 15:20:46-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

Documento assinado digitalmente
 **TAYLA CASTILHO CRIADO**
Data: 13/04/2026 16:03:48-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. TAYLA CASTILHO CRIADO (Participação Virtual)
Campus Ilha Solteira / Instituto Federal de São Paulo - IFSP

Ilha Solteira, 26 de fevereiro de 2026.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, Pedro, e à minha mãe, Solange, pilares da minha formação humana e profissional; à minha irmã, Beatriz, presença constante nos momentos de desafio; e à minha namorada, Jackeline, companheira leal em cada etapa deste percurso. Estendo esta dedicatória a todos que, de forma sincera, acreditaram, incentivaram e caminharam ao meu lado ao longo dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste mestrado representa a consolidação de uma trajetória construída com esforço, disciplina e convicções profundas. No centro dessa caminhada, reconheço a presença de Deus, fundamento da minha fé e referência permanente de equilíbrio, guiado por Provérbios 16:3. Nos momentos de maior exigência, foi na espiritualidade que encontrei serenidade, discernimento e força para seguir adiante. Sempre compreendi que o desenvolvimento humano exige não apenas preparo técnico, mas também inteligência emocional e inteligência espiritual, dimensões que sustentaram minhas decisões e minha perseverança.

Aos meus pais, Solange e Pedro, expresso minha gratidão profunda. De minha mãe, levo como princípio a convicção de que o conhecimento é patrimônio inalienável. Seu exemplo de trabalho digno, seguido de sua formação como pedagoga e de sua atuação como professora, consolidou em mim a certeza de que a educação transforma realidades.

De meu pai não herdei apenas o nome. Herdei valores, firmeza de caráter e a coragem de acreditar nos próprios sonhos. Sempre me incentivou a ampliar horizontes e esteve ao meu lado, inclusive percorrendo fisicamente os caminhos dessa jornada acadêmica, buscando alternativas e oportunidades sem medir esforços. Mesmo sem ter conhecido meu avô paterno, já falecido, compreendi, por meio das histórias familiares, que carrego traços semelhantes aos dele, especialmente a paixão pelo Santos, pela viola e pela política.

Ao meu avô materno, José Ferreira, e à minha avó materna, Maria Inês, agradeço pelos ensinamentos transmitidos com serenidade e dignidade. À minha avó paterna, Margarida, registro meu reconhecimento pelo carinho e incentivo constantes. À minha bisavó materna, a quem carinhosamente chamava de vó Ana, dedico um agradecimento especial pelas memórias afetivas e pela marca deixada em minha formação humana. À minha irmã, Beatriz, agradeço pela parceria e pela presença firme ao longo de toda a caminhada.

Reconheço também o apoio concreto de minha família em momentos decisivos, seja na busca por moradia, seja no suporte financeiro quando necessário, permitindo que eu mantivesse dedicação integral aos estudos.

Dedico este trabalho à minha namorada, Jackeline Carrilho, cuja presença foi essencial durante todo o percurso. Sua compreensão diante das ausências, seu incentivo permanente e sua capacidade de fortalecer minha confiança nos momentos de maior exigência acadêmica foram determinantes para que eu mantivesse equilíbrio e foco. Estendo minha gratidão à sua família pelo acolhimento e apoio constantes.

Agradeço aos amigos e colegas de pesquisa pela colaboração intelectual, pela troca de experiências e pelo apoio mútuo que enriqueceram este trabalho, em especial a Marcus Cassales, companheiro de caminhada na pesquisa, e aos amigos do GPPDM, cujo ambiente colaborativo fortaleceu a qualidade científica deste estudo.

Registro meu reconhecimento ao meu orientador, Dr. Sérgio, pela dedicação, pelo rigor científico e pela disposição constante em orientar com excelência. Ao meu coorientador, Me. Matheus, expresso gratidão especial por ter sido o grande incentivador do meu ingresso no mestrado, além de acompanhar com atenção técnica e incentivo permanente cada fase desta pesquisa.

Agradeço à Univesp pela bolsa de estudos que me permitiu atuar como facilitador e orientador de Projetos Integradores, vivenciando a experiência da docência e ampliando minha formação acadêmica e profissional.

Por fim, agradeço ao Departamento de Engenharia Civil – DEC e a todos os seus colaboradores pelo suporte institucional e pelo ambiente acadêmico que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.

Esta conquista é resultado de fé, valores sólidos, trabalho consistente e cooperação. A todos que fizeram parte dessa trajetória, minha gratidão permanente.

RESUMO

O presente estudo investigou a influência da temperatura de prensagem, 80 °C e 100 °C, nas propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados compósitos constituídos por partículas de *Pinus* spp. com adição de 10% de politereftalato de etileno (PET) reciclado, utilizando adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (PUR) na proporção de 25% como agente aglutinante. A investigação foi fundamentada em revisão bibliográfica sistemática conduzida conforme o protocolo PRISMA 2020, contemplando estudos publicados na última década nas bases ScienceDirect e Periódicos CAPES. A organização e análise bibliométrica dos documentos foram realizadas com o auxílio dos softwares Rayyan e VOSviewer. Com o objetivo de compreender o panorama científico relacionado ao uso de materiais alternativos na produção de painéis lignocelulósicos aglomerados, foram selecionados e analisados 61 estudos. No âmbito experimental, as partículas foram classificadas segundo granulometria e submetidas à regularização de umidade, seguindo procedimentos normativos brasileiros. As propriedades físicas e mecânicas foram avaliadas de acordo com os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 14810-2:2024, abrangendo densidade aparente, inchamento em espessura, resistência à tração perpendicular e comportamento mecânico em flexão. Os resultados evidenciaram que a elevação da temperatura de prensagem promoveu melhoria no desempenho físico e mecânico dos painéis. Observou-se redução do inchamento em espessura após 24 horas de 21,43% para 17,61% e diminuição do teor de umidade de 6,92% para 5,36%. No âmbito mecânico, verificou-se incremento significativo das propriedades estruturais, com aumento da tensão máxima de 3,89 MPa para 7,16 MPa, do módulo de elasticidade de 1401 MPa para 1873 MPa e da resistência à flexão de 16,21 MPa para 23,76 MPa. Esses resultados demonstram que o aumento da temperatura de prensagem favorece a consolidação do painel e a eficiência da interação entre matriz lignocelulósica, polímero reciclado e adesivo poliuretano, contribuindo para o desenvolvimento de materiais compósitos sustentáveis com potencial de aplicação nas indústrias moveleira e da construção civil.

Palavras-chave: compósitos madeira-plástico; variação de temperatura em painéis de madeira, resistência a umidade

ABSTRACT

The present study investigated the influence of pressing temperature, 80 °C and 100 °C, on the physical and mechanical properties of composite particleboards produced with *Pinus* spp. particles and the addition of 10% recycled polyethylene terephthalate (PET), using polyurethane adhesive derived from castor oil (PUR) at a content of 25% as the binding agent. The research was supported by a systematic literature review conducted according to the PRISMA 2020 protocol, considering studies published over the last decade in the ScienceDirect and CAPES Periodicals databases. The organization and bibliometric analysis of the selected documents were performed using the Rayyan and VOSviewer software. In order to understand the scientific panorama related to the use of alternative materials in the production of lignocellulosic particleboards, a total of 61 studies were selected and analyzed. In the experimental stage, the particles were classified according to granulometry and subjected to moisture conditioning, following Brazilian normative procedures. The physical and mechanical properties were evaluated according to the requirements established by ABNT NBR 14810-2:2024, including apparent density, thickness swelling, internal bond strength, and bending performance. The results indicated that increasing the pressing temperature improved the physical and mechanical performance of the panels. A reduction in thickness swelling after 24 h from 21.43% to 17.61% and a decrease in moisture content from 6.92% to 5.36% were observed. Regarding the mechanical behavior, significant increases were identified, with maximum stress rising from 3.89 MPa to 7.16 MPa, modulus of elasticity from 1401 MPa to 1873 MPa, and bending strength from 16.21 MPa to 23.76 MPa. These findings demonstrate that higher pressing temperatures enhance panel consolidation and improve the interaction between the lignocellulosic matrix, recycled polymer, and polyurethane adhesive, contributing to the development of sustainable composite materials with potential applications in the furniture and construction industries.

Keywords: wood-plastic composites; temperature variation in wood panels; moisture resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Biocapacidade per capita do Brasil	21
Figura 2 - Estrutura da revisão sistemática da literatura utilizada neste estudo.....	27
Figura 3 - Processamento da revisão sistemática da literatura	30
Figura 4 - Publicações de estudos no decorrer dos últimos 10 anos	34
Figura 5 - Representação da relação dos artigos publicados com os países de origem dos autores	35
Figura 6 - Mapa global da relação da quantidade de artigos publicados e seus países de origem	37
Figura 7 - Conexões colaborativas dos autores	38
Figura 8 - Mapeamento de coocorrência.....	39
Figura 9 - Transformação da madeira em particulados: (a) plaina desengrossadeira e (b) maravalhas.....	61
Figura 10 - Classificação granulométrica em um agitador elétrico de peneiras	61
Figura 11 - Conjunto de peneiras utilizadas para realização do ensaio para determinação da composição granulométrica.....	62
Figura 12 - Material utilizado para avaliação da composição granulométrica das misturas: (a) <i>Pinus</i> spp., (b) PET e (c) <i>Pinus</i> spp. + PET	63
Figura 13 - Processo de homogeneização dos materiais	65
Figura 14 - Colchão de partículas	66
Figura 15 - Realização do ciclo de prensagem.....	66
Figura 16 - Realização dos três painéis de cada mistura.....	67
Figura 17 - Medição da densidade dos painéis, utilizando paquímetro e micrômetro	68
Figura 18 - Aferição da massa dos corpos de prova para cálculo da densidade	68
Figura 19 - Realização do teste de inchamento da espessura após vinte e quatro horas.....	70
Figura 20 - Ilustrações do ensaio de flexão estática.....	71
Figura 21 - Realização dos corpos de prova para realização do teste de resistência à tração perpendicular.....	73
Figura 22 - Realização do teste de tração perpendicular	73
Figura 23 - Curva granulométrica	79
Figura 24 - Imagens de MEV das regiões da superfície e da região serrada do painel da mistura M1, com ampliações de 30× (1a), 1000× (1b), 1000× (2a), 1000× (2b), 100× (3a) e 500× (3b) .	85
Figura 25 - Imagens de MEV das regiões da superfície e da região serrada do painel da mistura M2, com ampliações de 1000× (1a), 500× (1b), 250× (2a), 250× (2b), 250× (3a) e 1000× (3b) .	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros de entrada de dados RBS	29
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Repercussão de Entrada.....	31
Tabela 2 - Critérios de busca e resultados.....	32
Tabela 3 - Artigos do Grupo 1	41
Tabela 4 - Artigos do Grupo 2	44
Tabela 5 - Artigos do Grupo 3	47
Tabela 6 - Artigos do Grupo 4	50
Tabela 7 - Artigos do Grupo 5	54
Tabela 8 - Artigos do Grupo 6	57
Tabela 9 - Composição da mistura utilizada para produção dos painéis	60
Tabela 10 - Composição granulométrica do <i>Pinus</i> spp.....	76
Tabela 11 - Composição granulométrica do PET	77
Tabela 12 - Composição granulométrica do <i>Pinus</i> spp. + 25% PET	78
Tabela 13 -Estatística descritiva da densidade aparente por temperatura de prensagem	80
Tabela 14 - Verificação de pressupostos e comparação inferencial entre as temperaturas.....	81
Tabela 15 - Síntese da interpretação normativa segundo ABNT NBR 14810-2 e ANSI A208.1	82
Tabela 16 - Corpos de prova que excederam o limite de $\pm 7\%$ de variação da densidade	82
Tabela 17 - Síntese dos resultados das propriedades físicas e mecânicas dos painéis.....	83

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila-butadieno-estireno
AD	Teste de Anderson–Darling
ANOVA	Análise de variância
ANSI	American national standards institute
ASTM	Astm international
BPUP	Prepolímero de poliuretano bloqueado
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CDHU	Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano
CM	Teste de comparações múltiplas
cp	Corpo de prova
cps	Corpos de prova
CPUR	Poliuretano à base de óleo de mamona
CV	Coeficiente de variação
DATEc	Documento de Avaliação Técnica
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DIN	Deutsches Institut für Normung
DP	Desvio padrão
EN	Norma europeia
EPS	Poliestireno expandido
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
GNP	Nanoplaquetas de grafeno
HDPE	Polietileno de alta densidade
IB	Ligação interna
IC95%	Intervalo de confiança de 95%
ISO	International Organization for Standardization
LDPE	Polietileno de baixa densidade

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

M1	Mistura 1, prensada a 80 °C
M2	Mistura 2, prensada a 100 °C
MAPE	Poliétileno enxertado com anidrido maleico
MAPP	Polipropileno enxertado com anidrido maleico
MDF	Painel de fibras de média densidade
MDI	Diisocianato de difenilmetano
MDP	Painel de partículas de média densidade
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MOE	Módulo de elasticidade
MOR	Módulo de ruptura
MUF	Melamina-ureia-formaldeído
NBR	Norma brasileira
NIPU	Poliuretano não isocianato
NM	Norma mercosul
P2	Painel não estrutural para uso interno em condições secas
PBQP-H	Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat
PET	Politereftalato de etileno
PF	Fenol-formaldeído
PHBV	Poli(hidroxibutirato-co-hidroxivalerato)
PIB	Produto interno bruto
pMDI	Diisocianato de difenilmetano polimérico
PP	Polipropileno
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
PS	Poliestireno
PUR	Poliuretano à base de óleo de mamona
PVA	Álcool polivinílico
PVAc	Acetato de polivinila
PVC	Policloreto de vinila

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

PVOH	Álcool polivinílico
RBS	Revisão bibliográfica sistemática
RIS	Formato de intercâmbio de referências bibliográficas
RSL	Revisão sistemática da literatura
SiNAT	Sistema Nacional de Avaliações Técnicas
SMA	Copolímero estireno-anidrido maleico
TMPTA	Trimetilolpropano triacrilato
TP	Tração perpendicular
TS	Inchamento em espessura
UF	Ureia-formaldeído
UFWPC	Compósito madeira-plástico com ultra-alto teor de carga
ULEF-UF	Ureia-formaldeído de ultrabaixa emissão
UNESP	Universidade estadual paulista
WA	Absorção de água
WEEE	Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos
WF-HDPE	Compósito fibra de madeira–polietileno de alta densidade
WPC	Compósito madeira-plástico

LISTA DE SÍMBOLOS

A24h	Absorção de água após 24 h
B	Largura do corpo de prova
b1	Dimensão de uma aresta/lado do corpo de prova
b2	Dimensão de uma aresta/lado do corpo de prova
d	Deflexão correspondente à carga P1
D	Densidade nominal do painel (Eq. 2)
D	Densidade do corpo de prova (Eq. 4 e 5)
D	Distância entre apoios do aparelho (Eq. 9 a 11)
D%	Variação percentual da densidade
D50	Diâmetro mediano da distribuição granulométrica
Dmédia	Densidade média dos corpos de prova
E	Espessura média do corpo de prova
e	Espessura do corpo de prova
Ef	Espessura final após imersão
Ei	Espessura inicial antes da imersão
F	Estatística do teste de Levene
g	Tamanho de efeito de Hedges
I / I24h / Inc-24h	Inchamento em espessura após 24 h
M	Massa total da mistura (Eq. 2)
M	Massa do corpo de prova (Eq. 4)
MF	Módulo de finura
Ms	Massa seca do corpo de prova
Mu	Massa úmida do corpo de prova
n	Número de observações/corpos de prova
P	Carga de ruptura
p	Valor de probabilidade
P1	Carga no limite proporcional

LISTA DE SÍMBOLOS

S	Área da superfície do corpo de prova
t	Estatística do teste t de Student
T	Temperatura de prensagem
U	Estatística do teste de Mann–Whitney
U / TU	Teor de umidade
V	Volume do painel (Eq. 2)
V	Volume do corpo de prova (Eq. 3 e 4)
W	Estatística do teste de Shapiro–Wilk
$\bar{x}$	Valor médio
α	Nível de significância
ε	Deformação na ruptura
$\sigma_{\max}$	Tensão máxima

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
2	OBJETIVO GERAL	25
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA	26
3.1	FUNDAMENTAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO ANALÍTICA	26
3.1.1	Etapas, Procedimentos e Referenciais Aplicados	28
3.1.2	Entrada.....	28
3.1.3	Processamento	30
3.1.4	Saída	31
3.1.5	Repercussão de Entrada.....	31
3.1.6	Repercussão do Processamento.....	32
3.1.7	VOSviewer	37
3.1.7.1	<i>Análise de Coautoria no VOSviewer.....</i>	37
3.1.7.2	<i>Visualização da Coocorrência de Palavras-chave.....</i>	39
3.1.8	Caracterização do estado da arte.....	40
3.1.8.1	<i>Grupo 1.....</i>	41
3.1.8.2	<i>Grupo 02.....</i>	44
3.1.8.3	<i>Grupo 3.....</i>	46
3.1.8.4	<i>Grupo 4.....</i>	49
3.1.8.5	<i>Grupo 5.....</i>	53
3.1.8.6	<i>Grupo 6.....</i>	56
4	METODOLOGIA.....	60
4.1	DEFINIÇÃO DAS MISTURAS	60
4.2	PRODUÇÃO E PROCESSAMENTO DE MARAVALHAS	60
4.3	CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS	61
4.4	ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	62

4.5	REGULARIZAÇÃO DA UMIDADE	63
4.6	DETERMINAÇÃO DA MASSA TOTAL DAS MISTURAS PARA PRODUÇÃO DOS PAINÉIS.....	64
4.7	PRODUÇÃO DOS PAINÉIS.....	65
4.8	ENSAIOS FÍSICOS	67
4.8.1	Densidade (D).....	67
4.8.2	Teor de Umidade	69
4.8.3	Inchamento em espessura 24h (I24h) e Absorção após 24h (A24h)	69
4.9	Ensaio Mecânicos.....	70
4.9.1	Modulo de Resistência (MOR).....	71
4.9.2	Módulo de Elasticidade (MOE).....	72
4.9.3	Resistência à Tração Perpendicular (TP).....	72
5	RESULTADO E DISCUSSÕES.....	75
5.1	APRESENTAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	75
5.1.1	Composição granulométrica do <i>Pinus</i> spp.	75
5.1.1.1	<i>Composição granulométrica do PET.....</i>	76
5.1.1.2	<i>Composição granulométrica da mistura <i>Pinus</i> spp. + 25% PET.....</i>	77
5.1.1.3	<i>Interpretação comparativa da curva granulométrica.....</i>	79
5.2	DENSIDADE	80
5.3	AVALIAÇÕES POR MEIO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS PAINÉIS	83
5.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV	84
6	CONCLUSÃO.....	89
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
8	APÊNDICE A - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE IDENTIFICAÇÃO, TRIAGEM E SELEÇÃO DOS ESTUDOS (BASEADO NO PROTOCOLO PRISMA)	99

1 INTRODUÇÃO

As plantas exercem funções fundamentais nos ecossistemas ao conservar a biodiversidade, regular o clima e permitir a conexão entre áreas naturais fragmentadas, contribuindo para a manutenção da vida no planeta (Aslanoğlu *et al.*, 2025).

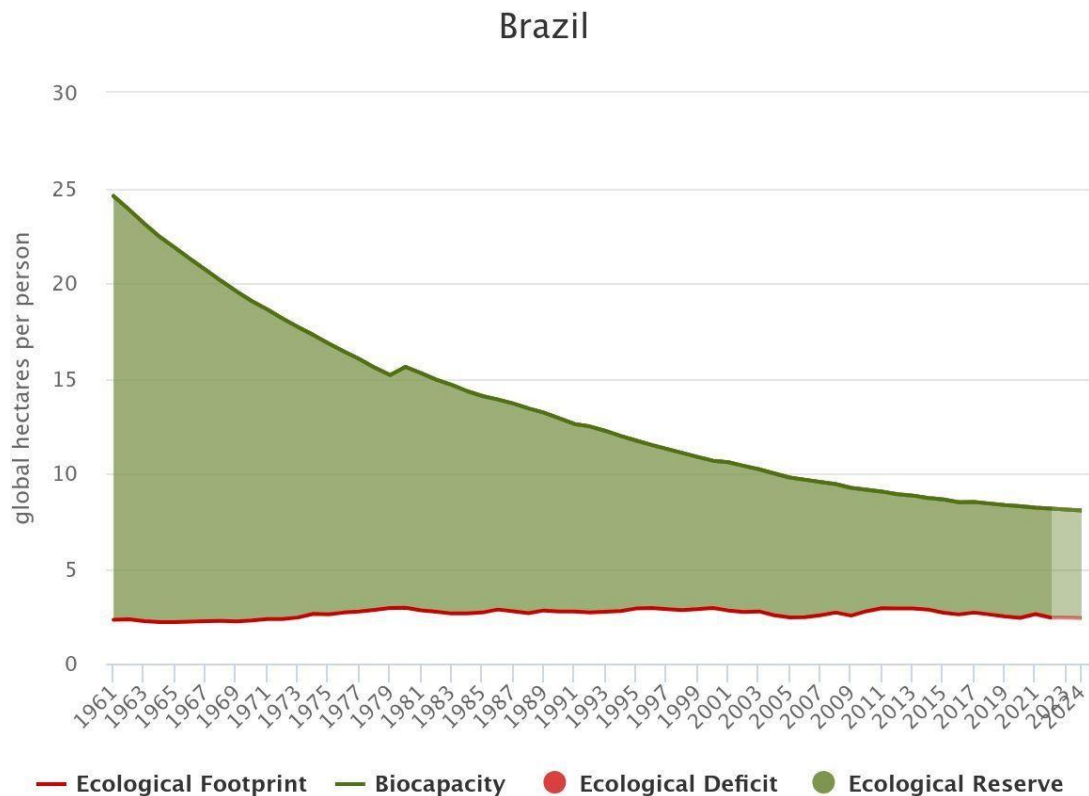
As atividades antrópicas têm promovido alterações profundas na cobertura vegetal do planeta, com redução expressiva das áreas florestais em escala global. Estimativas históricas indicam que, desde o fim da última era glacial, o mundo perdeu aproximadamente um terço de suas florestas, o que corresponde à permanência de cerca de 68% da cobertura original. Paralelamente, a literatura aponta que as taxas contemporâneas de extinção de espécies são substancialmente superiores às taxas naturais de fundo, em magnitude frequentemente situada entre 100 e 1.000 vezes, configurando um cenário compatível com o avanço de uma sexta extinção em massa (Ritchie; Rosado; Roser, 2021; Ceballos *et al.*, 2015; Ceballos *et al.*, 2020).

Uma das formas de quantificar o impacto do ser humano no meio ambiente é a pegada ecológica que representa a área biologicamente produtiva necessária para sustentar os padrões de consumo de uma população. Esses indicadores avaliam, respectivamente, a demanda humana por recursos naturais e a capacidade dos ecossistemas de regenerá-los, ambos expressos em hectares globais (gha) (Global Footprint Network, 2025). A partir da análise dos dados mais recentes fornecidos por essa rede global (edições de 2022 e estimativas para 2024), verifica-se que a maioria dos países desenvolvidos apresenta uma Pegada Ecológica significativamente superior à sua Biocapacidade nacional, configurando um estado de déficit ecológico permanente.

Ainda segundo o Global Footprint Network (2025), o Brasil mantém, historicamente, um expressivo superávit ecológico, ou seja, sua biocapacidade excede a Pegada Ecológica nacional. Isso significa que o país consome menos recursos naturais do que é capaz de regenerar, posicionando-se como uma das poucas nações com reserva ecológica positiva.

Em 2024, a biocapacidade per capita brasileira foi estimada em aproximadamente 8,0 hectares globais (gha), enquanto a Pegada Ecológica per capita é de cerca de 2,7 gha, resultando em uma reserva ecológica superior a 5 gha por habitante. Essa condição é favorecida pela ampla extensão territorial do Brasil, sua diversidade de ecossistemas e a presença significativa de áreas florestais e agrícolas produtivas. Mesmo com decaimento da sua biocapacidade em um cenário global, essa vantagem coloca o país em posição estratégica para liderar discussões sobre desenvolvimento sustentável, soberania ambiental e comércio de serviços ecossistêmicos, conforme a Figura 1 a seguir (Global Footprint Network, 2025).

Figura 1 - Biocapacidade per capita do Brasil



Fonte: Global Footprint Network (2025)

De acordo com o Sistema Nacional de Informações Florestais, o Brasil registrou, em 2024, cerca de US\$ 18,1 bilhões em exportações de produtos florestais madeireiros. Considerando-se que o Produto Interno Bruto brasileiro, em dólares correntes, foi estimado em US\$ 2,171 trilhões para o mesmo período, verifica-se que tais exportações corresponderam a aproximadamente 0,8% do PIB nacional. Esse percentual confirma a expressiva contribuição do setor florestal para a economia brasileira, sobretudo por se referir exclusivamente ao desempenho exportador dos produtos madeireiros, sem incluir a dinâmica do mercado doméstico, os produtos florestais não madeireiros e os impactos indiretos e induzidos da cadeia florestal sobre renda, emprego e atividade econômica (Sistema Nacional de Informações Florestais, 2026; Fundo Monetário Internacional, 2025).

Em 2023, o Brasil registrou aproximadamente 10,0 milhões de hectares de árvores plantadas. Entre os principais gêneros cultivados, o *Pinus* spp. destacou-se na segunda colocação em área plantada, com cerca de 1,9 milhão de hectares, o que correspondeu a 19% do total nacional. Esse dado confirma a expressiva participação desse gênero na silvicultura brasileira, especialmente em cadeias produtivas vinculadas à madeira sólida, aos painéis reconstituídos, à celulose e a outros produtos de base florestal (Indústria Brasileira de Árvores, 2023).

A madeira permanece entre as matérias-primas mais relevantes para a indústria de transformação, em razão de sua ampla aplicabilidade e de características intrínsecas, como anisotropia, higroscopicidade, heterogeneidade e porosidade, que condicionam seu comportamento físico e mecânico e, ao mesmo tempo, ampliam suas possibilidades de uso tecnológico. Nesse contexto, os painéis reconstituídos à base de madeira assumem papel estratégico, pois podem ser produzidos tanto com madeira de florestas plantadas quanto com resíduos lignocelulósicos, viabilizando aplicações em diferentes segmentos industriais, com destaque para a indústria moveleira e a construção civil (Duarte, 2017; Costa *et al.*, 2024; Souza *et al.*, 2023).

Entretanto, o aproveitamento de resíduos como matéria-prima para painéis demanda cautela técnica, uma vez que a variabilidade dimensional, anatômica e físico-química desses materiais pode comprometer a homogeneidade do colchão e, consequentemente, o desempenho final do produto quando comparado àquele obtido com matéria-prima padronizada proveniente de florestas plantadas. Ainda assim, a incorporação de resíduos lignocelulósicos à produção de painéis reconstituídos representa alternativa tecnicamente promissora, pois agrega valor a subprodutos industriais, reduz a pressão sobre a demanda por madeira in natura e favorece estratégias produtivas alinhadas à racionalização do uso de recursos florestais (Abreu; Mendes; Iwakiri, 2009; Costa *et al.*, 2024; Leite, 2023).

No caso das espécies florestais cultivadas no Brasil, a diferença entre *Pinus* spp. e *Eucalyptus* também ajuda a explicar a dinâmica recente da silvicultura nacional. De acordo com publicações da Embrapa, o cultivo de *Pinus* spp. apresenta maior restrição edafoclimática e concentração regional, ao passo que o *Eucalyptus* possui ampla adaptabilidade às condições de clima e solo do território brasileiro. Essa diferença contribui para a expansão contínua do eucalipto e para a perda relativa de participação do *Pinus* spp. na composição das florestas plantadas do país (Aguiar, 2014; Santarosa; Penteado Júnior; Goulart, 2014).

O uso de partículas de *Pinus* spp. como componente lignocelulósico tem sido amplamente empregado na produção de painéis aglomerados, conforme demonstrado em diversos estudos. Buzo (2018), Bispo (2020), Trevisan (2021), Souza (2022) e Herradon (2023) utilizaram resíduos dessa espécie, isoladamente ou em combinação com outros materiais, como bagaço de cana, fibra de coco, seringueira e eucalipto, com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica e o desempenho físico-mecânico dos painéis produzidos. Sendo uma possível relevância do *Pinus* spp. como matéria-prima disponível, versátil e eficiente na fabricação de painéis aglomerados com diferentes tipos de adesivos.

Os compósitos madeira-plástico (wood-plastic composites – WPC) representam uma alternativa promissora para o reaproveitamento de resíduos lignocelulósicos e poliméricos, resultando em materiais com propriedades mecânicas adequadas, resistência à deformação e estabilidade dimensional, desde que sejam corretamente definidos parâmetros como matriz, reforço, compatibilizante e processamento (Xu *et al.*, 2023; Khan *et al.*, 2025). A crescente produção de plásticos, associada à rápida transformação de muitos desses produtos em resíduos, intensifica o problema dos resíduos sólidos urbanos, especialmente no caso das embalagens, que correspondem a parcela expressiva do consumo global de polímeros (Khan *et al.*, 2025). No Brasil, de acordo com o 13º Censo da Reciclagem de PET, realizado pela ABIPET, em 2024 o país reciclou 53% das embalagens de PET descartadas pela população, o que correspondeu a 410 mil toneladas. Esse resultado demonstra avanço relevante, mas também evidencia que parcela significativa desse material ainda permanece fora do ciclo formal de reciclagem, o que reforça a importância de soluções de reaproveitamento industrial para resíduos plásticos pós-consumo (Associação Brasileira da Indústria do PET, 2025).

Já o PET, embora seja um polímero termoplástico 100% reciclável e originalmente desenvolvido para o armazenamento seguro de líquidos, apresenta desafios ambientais devido à elevada demanda e à ineficiência dos sistemas de coleta, o que tem favorecido seu descarte inadequado no meio ambiente (Cazella, 2022).

Arelado a essa problemática de gestão de resíduos, o polímero, é um material de impacto extremamente relevante no planeta e um dos materiais mais produzidos em escala global e amplamente presente no cotidiano humano. Cujas versatilidade tem motivado seu aproveitamento em soluções construtivas sustentáveis. A crescente produção de plásticos, somada à sua rápida descaracterização como bem de consumo, acentua o problema dos resíduos sólidos urbanos. Estima-se que cerca de 40% dos produtos plásticos se tornem lixo em menos de um mês, e que a produção global desse material ultrapasse 400 milhões de toneladas por ano, das quais um terço corresponde a embalagens (Cazella *et al.*, 2024).

De acordo com o 13º Censo da Reciclagem de PET no Brasil, realizado pela ABIPET (2025), em 2024 o país reciclou 53% das embalagens de PET descartadas pela população, o que representa um volume de 410 mil toneladas. Os 47% restantes tiveram como destino os aterros sanitários, lixões ou foram descartados de forma incorreta na natureza.

Já o PET, embora seja um polímero termoplástico 100% reciclável e originalmente desenvolvido para o armazenamento seguro de líquidos, apresenta desafios ambientais devido à elevada demanda e à ineficiência dos sistemas de coleta, o que tem favorecido seu descarte inadequado no meio ambiente (Cazella, 2022).

O Brasil destaca-se entre os principais geradores mundiais de resíduos plásticos, com cerca de 11,3 milhões de toneladas por ano, ocupando a quarta posição no ranking global. Desse volume, aproximadamente 7,7 milhões de toneladas são encaminhadas a aterros sanitários e cerca de 2,4 milhões de toneladas têm destinação irregular, o que evidencia a persistência de fragilidades estruturais na gestão e valorização desses resíduos (Heinrich Böll Stiftung; Break Free From Plastic, 2020).

Nesse contexto, a produção de painéis aglomerados configura uma alternativa relevante para a integração de materiais recicláveis e lignocelulósicos em cadeias produtivas de maior valor agregado. Todavia, a sustentabilidade e o desempenho desses painéis não dependem apenas da natureza da matéria-prima empregada, mas também do sistema de adesão adotado. Entre os adesivos mais utilizados, a resina ureia-formaldeído permanece predominante na indústria, embora apresente limitações importantes, notadamente a reduzida resistência à umidade e a liberação de formaldeído sob aquecimento, aspectos que restringem seu desempenho em determinadas condições de uso e ampliam as preocupações ambientais e sanitárias associadas ao seu emprego (Gilio, 2020).

O poliuretano derivado de óleo de mamona (PUR) desponta como alternativa tecnicamente viável às resinas sintéticas à base de UF, destacando-se por ser proveniente de fonte renovável, não emitir compostos tóxicos durante sua cura e proporcionar boas propriedades físico-mecânicas aos painéis aglomerados (Cazella, 2022). Sua adoção representa um avanço significativo na busca por materiais mais seguros e ambientalmente adequados.

Além da aplicação do PUR tem demonstrado elevada compatibilidade com diferentes materiais lignocelulósicos e resíduos, contribuindo para a produção de compósitos com desempenho satisfatório e alinhados às exigências normativas. Essa abordagem reforça o potencial do material na promoção de soluções mais sustentáveis na engenharia de painéis, conforme evidenciado por Oliveira (2019), Bispo (2021), Trevisan (2021), Herradon (2023), Souza (2022) e Cazella (2022).

À luz dessas considerações, propõe-se a produção de painéis aglomerados homogêneos constituídos por partículas de *Pinus* spp. associadas a fragmentos de PET reciclado oriundos de embalagens pós-consumo, empregando-se o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (PUR) como agente aglutinante, com ênfase na análise da influência da variação da temperatura de prensagem sobre o desempenho do material.

2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste estudo é analisar a influência da temperatura de prensagem nas propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados homogêneos, compostos por partículas de *Pinus* spp. e adição de PET reciclado, utilizando adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona (PUR) como agente aglutinante.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Por meio de uma revisão bibliográfica sistemática, realizar um levantamento analítico de recursos, matérias-primas tradicionais e alternativas, tecnologias, produtos e considerações registrados nos estudos científicos voltados aos painéis de madeira-plástico;
- Avaliar a influência da temperatura de prensagem nas propriedades dos painéis compósitos;
- Classificar os painéis obtidos conforme os requisitos prescritos pelos documentos normativos vigentes nacionais e internacionais

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

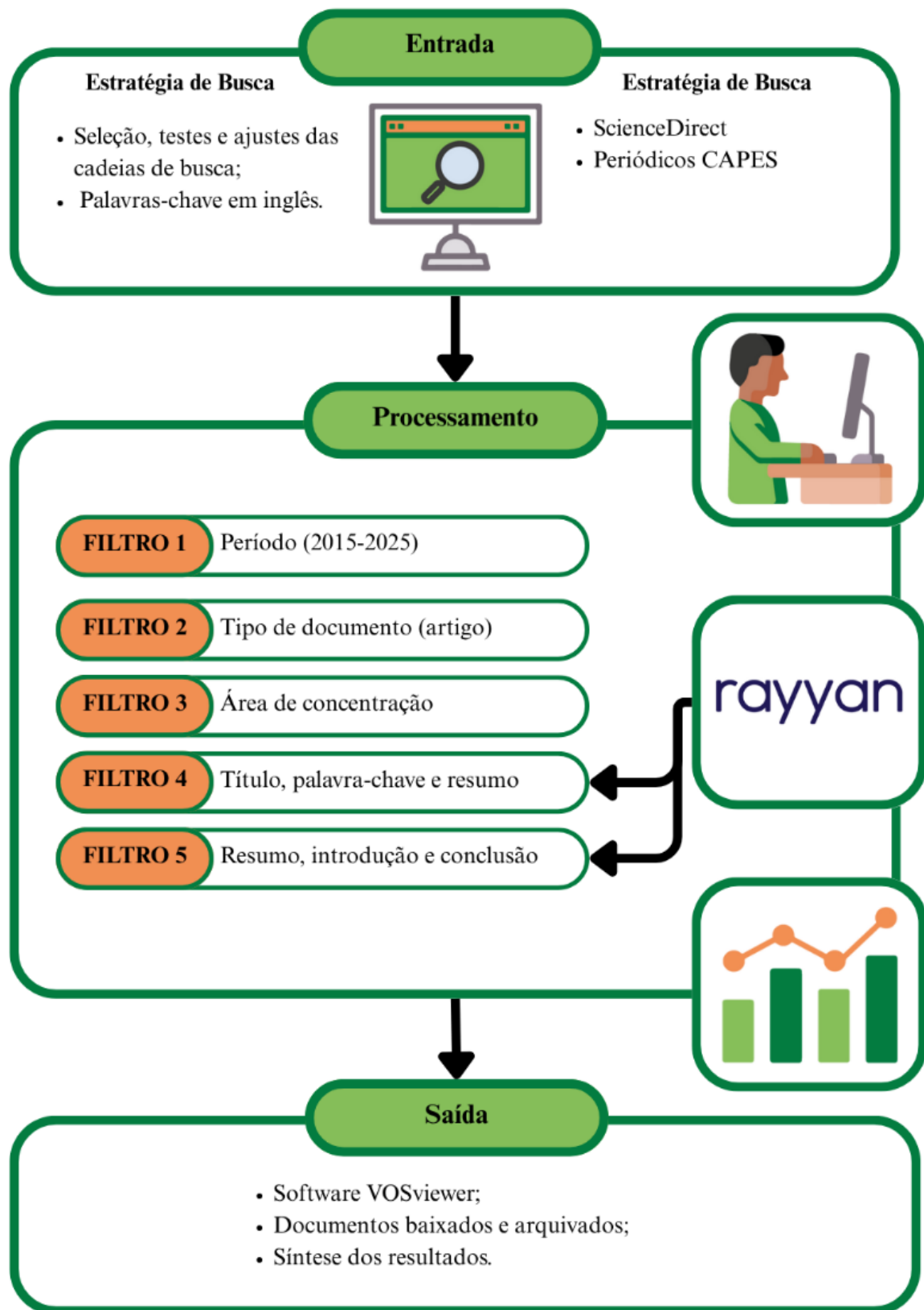
3.1 FUNDAMENTAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO ANALÍTICA

A Revisão Bibliográfica Sistemática, também denominada Revisão Sistemática da Literatura, constitui um procedimento metodológico estruturado e reproduzível voltado à identificação, seleção, avaliação e síntese de estudos relevantes sobre um tema específico. Esse tipo de abordagem possibilita mapear a produção científica disponível, organizar o estado do conhecimento e identificar métodos, técnicas, etapas e lacunas recorrentes no campo investigado, conferindo maior rigor ao processo de revisão e à fundamentação teórica da pesquisa (Conforto; Amaral; Silva, 2011; Ferenhof; Fernandes, 2016). No presente estudo, a condução da revisão observou os princípios da diretriz PRISMA 2020, elaborada para ampliar a transparência, a completude e a consistência do relato de revisões sistemáticas (Page *et al.*, 2022).

A pesquisa caracteriza-se como teórico-conceitual, de natureza exploratória e com abordagem quantitativa, uma vez que a organização, o tratamento e a interpretação dos dados bibliográficos foram desenvolvidos com apoio de procedimentos sistemáticos de quantificação da produção científica. A categorização dos estudos selecionados foi conduzida com base em lógica indutiva, partindo da observação dos achados particulares para a construção de inferências analíticas mais amplas sobre a literatura examinada (Benedicto *et al.*, 2012). Ademais, empregou-se a análise bibliométrica como recurso meta-analítico complementar, permitindo identificar padrões de publicação, relações entre autores, recorrência de temas e frequência de citações, de modo a evidenciar núcleos de maior relevância dentro do corpus analisado (Page *et al.*, 2022; Ferenhof; Fernandes, 2016).

A aplicação da RSL seguiu a estrutura metodológica proposta por Conforto *et al.* (2011), a qual organiza o processo em três fases principais: Entrada (*Input*), Processamento (*Processing*) e Saída (*Output*), conforme representado na Figura 2.

Figura 2 - Estrutura da revisão sistemática da literatura utilizada neste estudo



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.1.1 Etapas, Procedimentos e Referenciais Aplicados

A condução da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) foi orientada pelo modelo metodológico proposto por Conforto *et al.* (2011), cuja estrutura é amplamente reconhecida por sua objetividade, transparência e replicabilidade na sistematização do conhecimento científico. Este modelo organiza a revisão em três etapas principais, as quais foram adaptadas neste estudo para atender ao foco temático e às especificidades da pesquisa.

Na primeira etapa, referente à recuperação sistemática da literatura, seguiu-se o procedimento delineado por Conforto *et al.* (2011), que recomenda a definição de um protocolo contendo o objetivo da revisão, a construção da string de busca, a escolha das bases de dados e os critérios de inclusão e exclusão. Tal procedimento assegura a consistência e abrangência dos estudos selecionados, evitando vieses na coleta do material.

A segunda etapa, dedicada à análise bibliométrica, foi baseada na abordagem apresentada por Fernandes *et al.* (2016), permitindo o levantamento de dados quantitativos relacionados aos artigos encontrados, tais como a frequência de publicações ao longo dos anos, os autores mais recorrentes, os periódicos de maior destaque e as palavras-chave predominantes. Essa etapa contribuiu para o mapeamento estatístico do campo de pesquisa e a compreensão de sua evolução ao longo do tempo.

A terceira e última etapa, que compreende a análise de conteúdo, foi estruturada conforme os procedimentos metodológicos indicados por Cueur *et al.* (2019). Nessa fase, realizou-se a leitura aprofundada dos textos selecionados, com o objetivo de identificar os principais focos temáticos, as abordagens metodológicas adotadas, as contribuições teóricas dos estudos e, sobretudo, as lacunas que ainda permanecem na literatura. A sistematização desses dados permitiu construir uma visão integrada do estado da arte e propor direcionamentos para futuras investigações.

3.1.2 Entrada

A formulação da estratégia de busca foi elaborada a partir de um processo iterativo de seleção e refinamento de termos, utilizando operadores booleanos (AND, OR, NOT etc.) para ampliar ou restringir os resultados conforme a necessidade da investigação. Inicialmente, foi conduzida uma revisão exploratória da literatura, sem o rigor metodológico de uma revisão bibliográfica sistemática, com o intuito de mapear os termos recorrentes relacionados ao tema e identificar as palavras-chave mais representativas.

Optou-se por empregar na RBS os descritores em língua inglesa, considerando que a maioria das bases de dados científicas internacionais indexa seus conteúdos por meio de palavras-chave e resumos nesse idioma, mesmo em publicações originalmente escritas em outras línguas. Essa escolha teve como finalidade ampliar o alcance da busca e garantir a recuperação de um número mais significativo de estudos relevantes. Com o objetivo de conferir maior controle e transparência ao processo de busca, foi estabelecido previamente o problema de pesquisa, bem como o objetivo da revisão. A partir dessas definições, foram delimitadas as fontes de dados (bases primárias) e adotados critérios de inclusão e exclusão, além de parâmetros de qualificação dos estudos, conforme as diretrizes metodológicas da revisão bibliográfica sistemática aplicadas.

Quadro 1 - Parâmetros de entrada de dados RBS

**Método de
busca**

Adaptado de Conforto *et al.* (2011).

Problema	Qual a influência dos intervalos de temperatura de prensagem utilizados na produção de painéis aglomerados madeira-plástico e como essa variável influencia as propriedades físicas e mecânicas dos painéis segundo a literatura científica?
Objetivo	Realizar uma revisão bibliográfica sistemática (RBS) das publicações científicas relacionadas à produção e caracterização de painéis aglomerados madeira-plástico, com foco nas propriedades físicas e mecânicas.
Fontes Primárias	ScienceDirect Periódicos da CAPES
Protocolo	PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses)
String de busca	particleboard AND ("wood" OR "pinus") AND ("PET" OR "plastic")

Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.1.3 Processamento

O Filtro 1 estabeleceu o período de 2015 a 2025, com o objetivo de observar a evolução dos estudos voltados à produção de painéis aglomerados madeira-plástico (Figura 3).

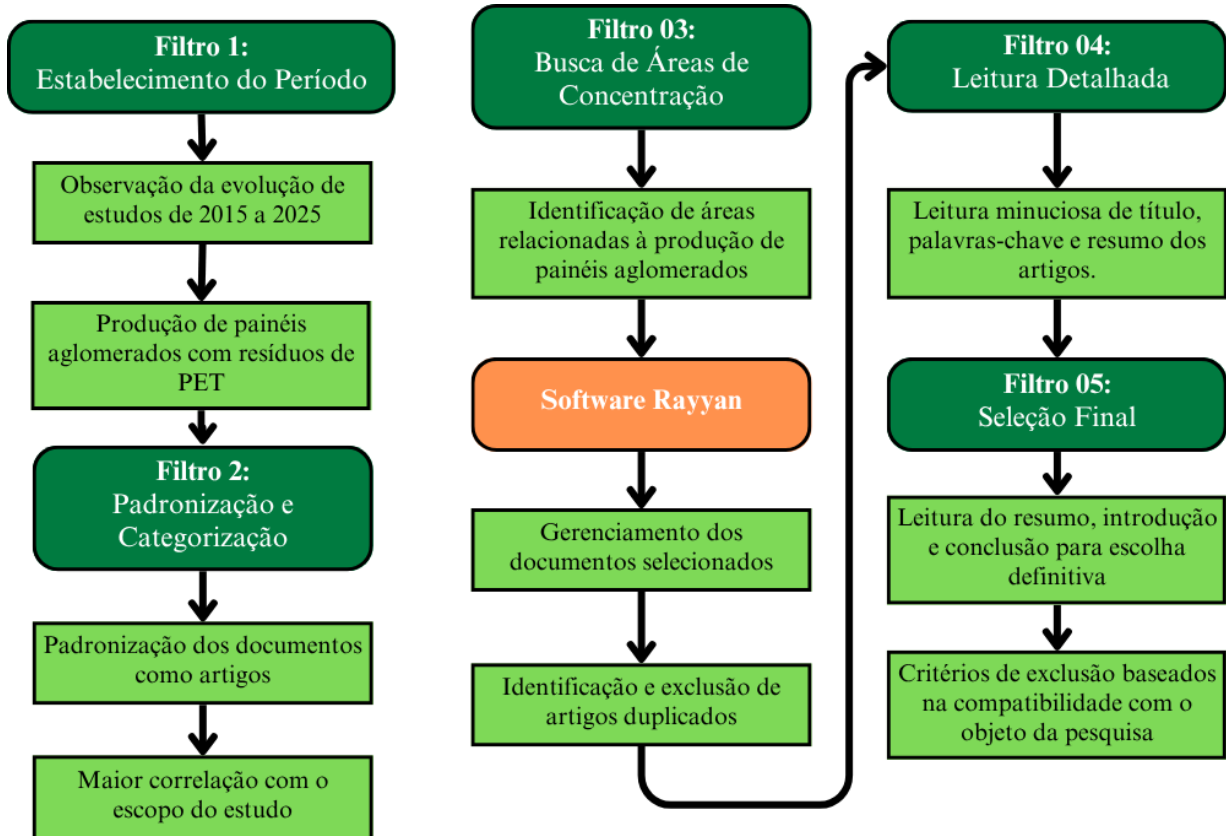
O Filtro 2 consistiu na padronização dos documentos selecionados, classificando-os como artigos científicos, por apresentarem maior correlação com o escopo da pesquisa (Figura 3).

No Filtro 3, foram identificadas as áreas de concentração diretamente relacionadas à produção de painéis aglomerados. O gerenciamento dos documentos selecionados foi realizado por meio do software Rayyan, que possibilitou tanto a organização dos dados quanto a identificação e exclusão de artigos duplicados (Figura 3).

Em seguida, o Filtro 4 contemplou a leitura detalhada dos títulos, palavras-chave e resumos dos artigos, servindo como etapa preliminar de triagem (Figura 3).

Por fim, o Filtro 5 envolveu a leitura criteriosa do resumo, introdução e conclusão dos artigos, utilizando critérios de exclusão baseados na compatibilidade com o objeto da pesquisa, a fim de definir a seleção final dos estudos analisados (Figura 3).

Figura 3 - Processamento da revisão sistemática da literatura



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.1.4 Saída

Para a condução da análise bibliométrica, foi empregado o software VOSviewer, desenvolvido por Van Eck e Waltman (2010), reconhecido internacionalmente por sua capacidade de gerar mapas de visualização baseados em dados bibliográficos. A ferramenta permite a construção de redes de coocorrência de palavras-chave, coautoria, cocitação e coocorrência de termos, com base em algoritmos de posicionamento que utilizam a distância entre os itens como representação da força de relacionamento.

Após a aplicação dos critérios de inclusão e a seleção dos artigos alinhados ao objetivo da pesquisa, procedeu-se ao download sistematizado dos documentos e sua organização em um banco de dados próprio. Essa etapa visou otimizar o acesso ao conteúdo completo dos estudos e garantir a rastreabilidade das informações extraídas.

A partir da base compilada, a análise dos dados foi realizada por meio da interface gráfica do VOSviewer, possibilitando a geração de representações visuais da produção científica relacionada ao tema. A síntese dos resultados bibliométricos foi estruturada em um relatório contendo indicadores como: autores mais produtivos, evolução temporal das publicações, termos-chave recorrentes e agrupamentos temáticos, configurando um panorama atualizado do estado da arte da área investigada.

3.1.5 Repercussão de Entrada

Conforme a Tabela 1, durante a busca avançada (booleana), as cadeias de busca foram combinadas para restringir o campo de interesse. Os resultados foram os seguintes: ScienceDirect, 1.717 documentos; e Periódicos CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), 100 documentos.

Tabela 1 – Repercussão de Entrada

	ScienceDirect (Elsevier)	Periódicos (CAPES)
String	particleboard AND ("wood" OR "pinus") AND ("PET" OR "plastic")	
RESULTADOS	1.717	100

Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.1.6 Repercussão do Processamento

O software Rayyan foi utilizado para gerenciar os documentos selecionados a partir das bases de dados ScienceDirect-Elsevier e Periódicos-CAPEs. Após a aplicação do Filtro 4 (tipo de documento: artigos científicos), foram selecionados 723 artigos, todos incluídos no formato RIS. A distribuição percentual por base de dados foi: ScienceDirect com 91,5% (660 artigos) e Periódicos CAPES com 8,7% (63 artigos), conforme a Tabela 2.

Durante a importação dos arquivos para o Rayyan, o software identificou automaticamente 7 documentos duplicados, os quais foram excluídos (representando 1,0% do total de artigos identificados após o Filtro 4). Após essa etapa, os artigos restantes foram organizados manualmente em ordem alfabética, o que auxiliou na confirmação da ausência de outros duplicados ocultos.

Após a exclusão dos duplicados, restaram 716 artigos para aplicação do Filtro 5 (área de concentração). Desse total, 179 artigos (25,0%) foram excluídos por não pertencerem às áreas-alvo, como saúde, química e biologia. Assim, permaneceram 544 artigos (75,0%) classificados nas áreas de Engenharia de Materiais, Ciências Ambientais e Engenharia. A distribuição foi: ScienceDirect com 92,3% (503 artigos) e Periódicos CAPES com 7,7% (41 artigos).

Posteriormente, 537 artigos foram avaliados quanto à elegibilidade, resultando na inclusão final de 61 estudos (11,4%) após leitura dos títulos, resumos, introduções e conclusões. 111 artigos (20,7%) foram excluídos por inadequação de palavras-chave e 61 artigos (11,4%) por inadequação ao conteúdo temático, totalizando 173 exclusões (32,2%) na etapa final de leitura.

Tabela 2 - Critérios de busca e resultados

	ScienceDirect	Periódicos da CAPES
FILTRO 01 Período	2015 - 2026	2015 - 2026
RESULTADOS	1.119	63
FILTRO 02 Tipo de documentos	Artigos	Artigos
RESULTADOS	660	54
FILTRO 03 Área de concentração	Engineering Materials Science Environmental Science	Multidisciplinar Engenharias

	ScienceDirect	Periódicos da CAPES
RESULTADOS	503	41
FILTRO 04 Leitura Título, Resumo e Palavras Chave	particleboard AND ("wood" OR "pinus") AND ("PET" OR "plastic")	
RESULTADOS	95	16
FILTRO 05 Leitura resumo ou introdução e conclusão	particleboard AND ("wood" OR "pinus") AND ("PET" OR "plastic")	
RESULTADOS	53	8

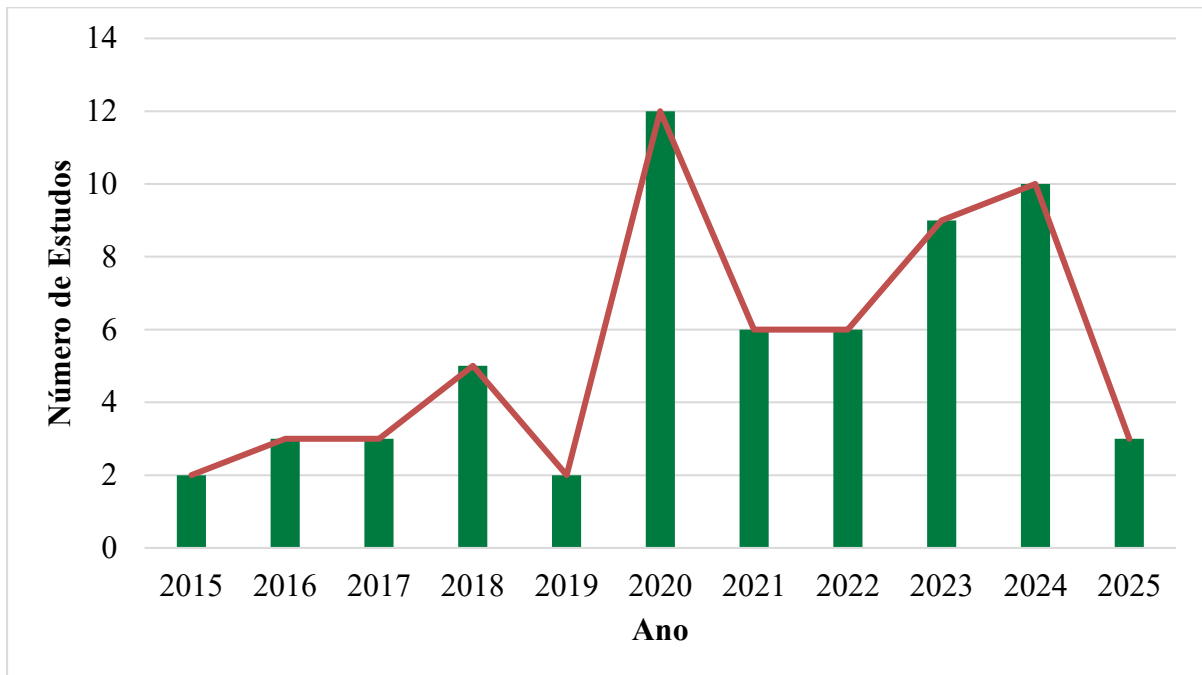
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A análise bibliométrica realizada, conforme a Apêndice A, a partir dos 61 estudos selecionados, permite compreender a evolução da produção científica no campo da utilização de materiais alternativos para a fabricação de painéis aglomerados, com destaque para o uso de resíduos lignocelulósicos, plásticos recicláveis como o PET e adesivos de base biológica. Essa investigação visa mapear a distribuição temporal, geográfica e temática da literatura científica, oferecendo suporte e contextualização à proposta metodológica desta dissertação.

A distribuição temporal das publicações, apresentada na Figura 4, revela que o interesse pelo tema ganhou força a partir de 2016, com oscilações nos anos seguintes. Em 2020 observa-se o primeiro grande pico, com 12 estudos publicados, representando 11% da amostra total. Após uma leve queda em 2021 e 2022 (ambos com 6 estudos, ou 6%), nota-se um novo crescimento em 2023 e 2024, com 9 (8%) e 10 estudos (9%), respectivamente. Já em 2025, os dados parciais indicam 3 publicações (3%).

Esse comportamento em ondas sugere uma tendência cíclica de crescimento e retração, que pode estar relacionada a fatores econômicos, políticos e ambientais globais. Ainda assim, o volume acumulado nos anos recentes evidencia a consolidação e amadurecimento do tema no cenário internacional que, conseqüentemente, reafirma sua relevância diante das crescentes exigências por soluções sustentáveis na indústria de painéis à base de madeira.

Figura 4 - Publicações de estudos no decorrer dos últimos 10 anos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

No que se refere à distribuição geográfica das publicações (Figura 5), observa-se que a China apresenta a maior participação entre os artigos analisados, com 12 publicações, o que representa aproximadamente 20% do total de 61 estudos. Essa expressiva presença evidencia o protagonismo da China nas pesquisas voltadas à utilização de materiais alternativos e sustentáveis na fabricação de painéis aglomerados.

O Brasil, com 9 artigos (15%), destaca-se como o segundo país com maior participação (Figura 5), refletindo o crescente envolvimento da comunidade científica brasileira com temáticas de sustentabilidade e reaproveitamento de resíduos industriais. Em seguida, a Índia aparece com 7 estudos (11%), consolidando-se também como um importante centro de produção científica nessa área.

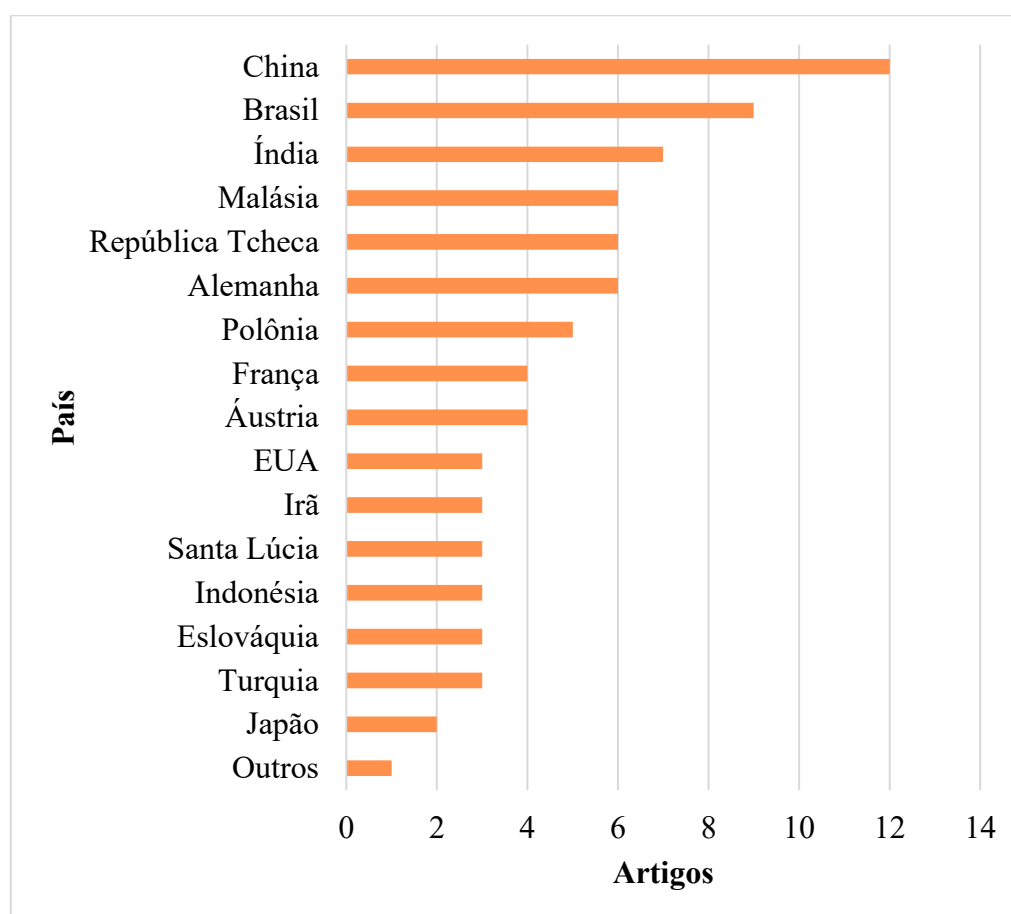
Ainda pela Figura 5, Alemanha, República Tcheca e Malásia compartilham cada uma 6 artigos (10%), indicando forte atuação em colaborações internacionais e no desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas à indústria madeireira e de compósitos. A Polônia contribuiu com 5 publicações (8%), seguida por França e Áustria, ambas com 4 artigos (7%).

Com 3 estudos cada (5%), aparecem Turquia, Eslováquia, Indonésia, Santa Lúcia, Irã e Estados Unidos, refletindo uma participação significativa de diferentes regiões do mundo. O Japão, com 2 artigos (3%), também marca presença nas investigações. Por fim, uma série de países contribuíram com 1 publicação cada (1,6%), entre eles: Romênia, México, Paquistão, Bulgária,

Coreia do Sul, Taiwan, Hungria, Noruega, Nigéria, Argélia, Tailândia, Ucrânia, Itália e Suécia (Figura 5), evidenciando a diversidade da colaboração internacional, ainda que de forma pontual.

A Figura 5 reflete, portanto, não apenas a origem institucional dos estudos, mas sim a presença de pelo menos um autor afiliado ao país mencionado em cada publicação, permitindo uma visão mais abrangente da cooperação científica internacional. Essa ampla participação geográfica evidencia que o debate em torno da sustentabilidade, reciclabilidade e inovação em materiais lignocelulósicos e plásticos é global, envolvendo desde potências científicas até nações em desenvolvimento com forte vocação tecnológica e ambiental.

Figura 5 - Representação da relação dos artigos publicados com os países de origem dos autores



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A representação espacial na Figura 5 reforça visualmente essa concentração geográfica, com destaque para o Brasil, que aparece como o segundo país com maior participação entre os estudos analisados, respondendo por cerca de 15% do total. A intensidade de cor atribuída ao país evidencia sua posição de relevância na produção científica sobre materiais alternativos para painéis aglomerados. Essa expressiva presença brasileira pode ser atribuída à disponibilidade de matérias-primas abundantes.

Um exemplo emblemático do crescente interesse global do uso da madeira na construção conforme verificam De Araujo *et al.* (2025) mediante a expansão das políticas públicas sobre esse fim, em que o Brasil já vêm implantando políticas nacionais de habitação baseada nesse recurso, incluindo os sistemas construtivos de light-woodframe e modular com painéis engenheirados. Mediante a técnica de pré-fabricação de painéis estruturais e estrutura de montantes serrados de Pinus, novas edificações em light-woodframe para fins habitacionais vêm sendo construídas em diferentes regiões.

Industrialmente produzidos, esses painéis incorporam elétrica, hidráulica, esquadrias que são pré-montadas na fábrica e montadas rapidamente no local. O governo estadual investiu R\$ 72 milhões em projetos como o conjunto Baleia Verde (30 edifícios de quatro pavimentos) e a construção de 518 unidades em São Sebastião, com entrega prevista até outubro/novembro de 2023, enfatizando a velocidade e eficiência dessa tecnologia. Segundo o secretário Marcelo Branco, “na quarta-feira levantamos um apartamento inteiro do térreo e, até o final desta semana, chegaremos até o final do edifício” (Governo do Estado de São Paulo, 2023).

Esses dados oficiais reforçam que a consolidação do Brasil como incentivadora de pesquisa e aplicação de materiais sustentáveis se dá não só pela disponibilidade de recursos, mas também por um contexto regulatório e político estruturado. Programas como o PBQP-H, o SiNAT e o DATec, além do apoio de instituições como a Caixa Econômica Federal e a CDHU, têm viabilizado a adoção em larga escala de sistemas construtivos como o light-woodframe em habitação social (Espíndola; Ino, 2009; Brasil, 2011). O país tem desenvolvido métodos estruturados para a implantação de inovações tecnológicas na construção civil, promovendo articulações entre universidades, setor público e empresas construtoras por meio de programas federais e diretrizes técnicas (Barbosa, 2023).

Figura 6 - Mapa global da relação da quantidade de artigos publicados e seus países de origem



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.1.7 VOSviewer

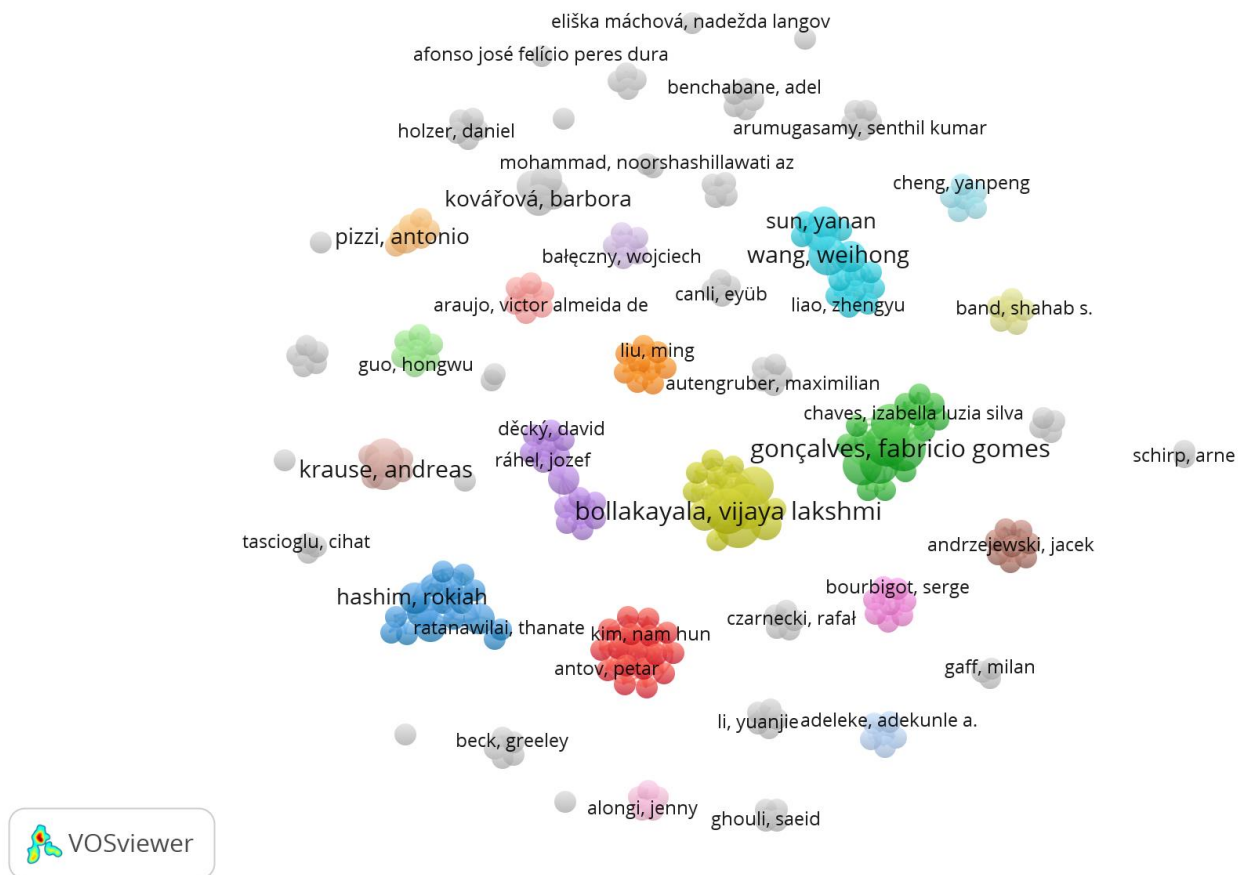
3.1.7.1 Análise de Coautoria no VOSviewer

Com o objetivo de explorar as conexões colaborativas entre os autores da literatura científica selecionada, foi realizada uma análise de coautoria utilizando o software VOSviewer, conforme a Figura 7.

Inicialmente, optou-se por criar um mapa baseado em dados bibliográficos, uma vez que a intenção era identificar relações entre autores, e não entre termos textuais ou dados de rede externa. A fonte de dados utilizada foi o registro em arquivo digital contendo os 61 artigos selecionados via Rayyan, previamente filtrados segundo os critérios definidos para esta revisão sistemática pelo Filtro 5.

Durante o processo de construção da Figura 7, o VOSviewer identificou um total de 261 autores, correspondendo a todos os pesquisadores que assinam os artigos da amostra analisada. Estabeleceu-se o limiar mínimo de um artigo por autor para inclusão no mapa, o que permitiu considerar a totalidade dos nomes. Em seguida, optou-se por selecionar os 261 autores com maior força total de ligação de coautoria.

Figura 7 - Conexões colaborativas dos autores



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Entretanto, o software detectou que muitos desses autores não apresentavam conexões entre si. A maior rede conectada identificada foi composta por apenas 17 autores, e optou-se por visualizar apenas o subconjunto conectado, a fim de representar de forma mais clara as interações significativas de coautoria presentes nos dados.

Durante o processamento, o software alertou que nem todos os autores estavam conectados entre si, indicando que parte da rede seria formada por nós isolados, ou seja, autores que não possuem publicações em coautoria com os demais. Optou-se, nesse caso, por manter todos os itens no mapa, inclusive os desconectados, a fim de preservar a totalidade da informação e evitar a exclusão de autores potencialmente relevantes, ainda que atuem de forma independente na produção científica.

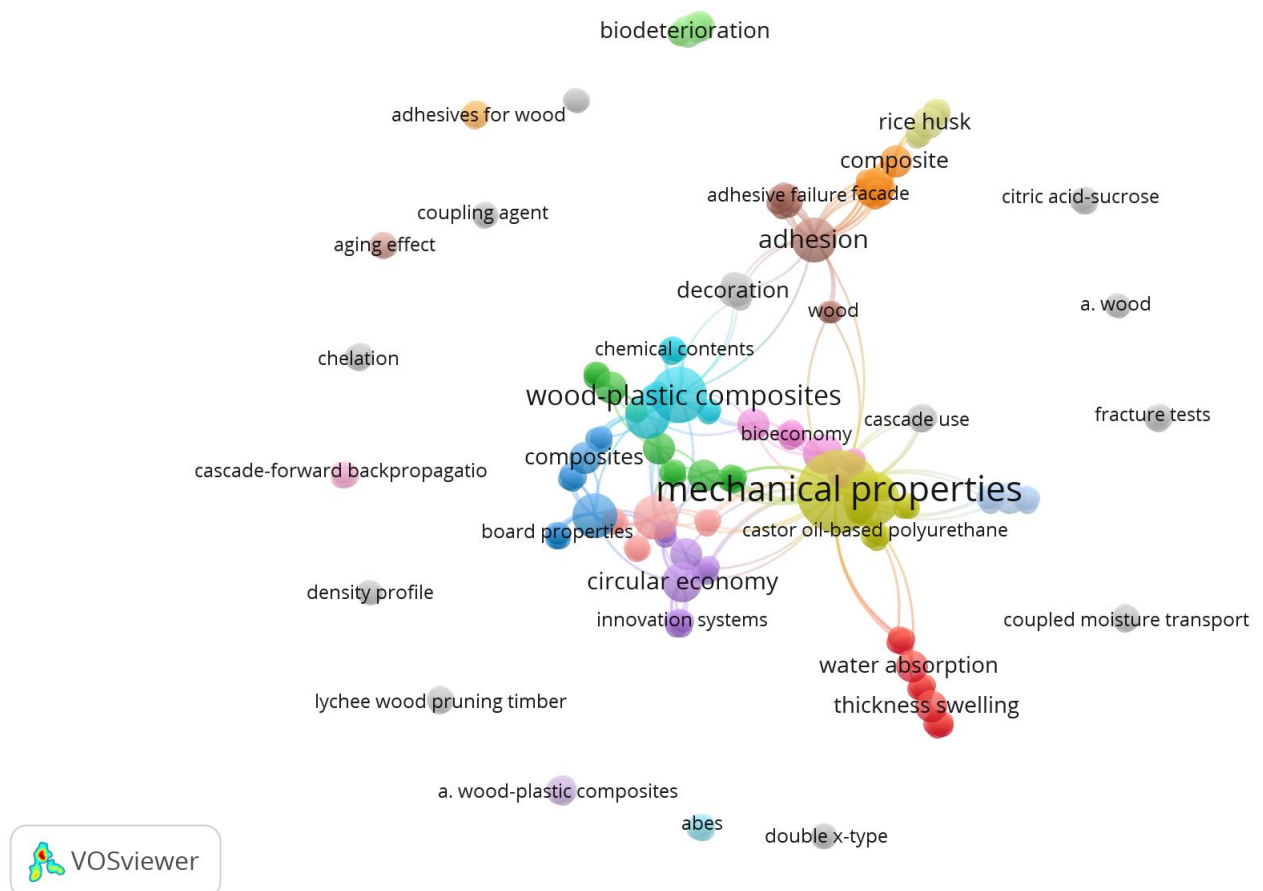
Essa abordagem permitiu visualizar a estrutura colaborativa da produção científica na área em estudo, ainda que dispersa, evidenciando a ausência de uma rede coesa e a predominância de produções isoladas ou em pequenos grupos. Tal resultado reforça a percepção de que o campo ainda está em consolidação, com oportunidades para o fortalecimento de parcerias e formação de comunidades de pesquisa mais articuladas.

3.1.7.2 Visualização da Coocorrência de Palavras-chave

A Figura 8 apresentada a seguir representa o resultado final de um mapeamento de coocorrência de palavras-chave realizado com auxílio do software VOSviewer. O objetivo deste mapeamento foi identificar os principais eixos temáticos abordados na literatura selecionada, de forma a evidenciar as conexões conceituais entre os tópicos centrais da pesquisa.

Para a construção dessa Figura 8, utilizou-se um arquivo, contendo 61 artigos previamente selecionados e exportados da plataforma Rayyan, com foco em estudos que envolvem o uso de adesivos alternativos e materiais recicláveis na fabricação de painéis aglomerados. A análise foi configurada para identificar a coocorrência de palavras-chave atribuídas pelos autores dos artigos, utilizando contagem completa (*full counting*), o que significa que cada ocorrência de um termo foi considerada integralmente. Adicionalmente, aplicou-se um arquivo de tesauro personalizado para padronizar variações terminológicas e garantir maior consistência nos dados.

Figura 8 - Mapeamento de coocorrência



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A partir dos dados extraídos, observou-se que o termo mais frequente e com maior força total de ligação foi “*mechanical properties*” (propriedades mecânicas), com 13 ocorrências, representando aproximadamente 21,3% do total de artigos.

Outros termos relevantes incluem “*adhesion*” (adesão) com 4 ocorrências (6,6%), “*wood-plastic composites*” (compósitos madeira-plástico) com 6 ocorrências (9,8%), “*particleboard*” (painel aglomerado) com 6 ocorrências (9,8%), e “*waste management*” (gestão de resíduos) com 4 ocorrências (6,6%).

Também se destacam termos como “*sawdust*” (serragem), “*characterization*” (caracterização), “*circular economy*” (economia circular), “*composite*” (compósito) e “*physical properties*” (propriedades físicas), todos com presença significativa. Esses resultados indicam que os estudos analisados se concentram majoritariamente nas propriedades físico-mecânicas dos materiais, na adesão entre componentes e na sustentabilidade, especialmente no reaproveitamento de resíduos e desenvolvimento de novos compósitos.

3.1.8 Caracterização do estado da arte

A coerência entre o problema de pesquisa, os objetivos específicos da dissertação e a interpretação dos 61 artigos selecionados na RSL exigiu a organização do corpus em seis grupos analíticos distintos. Considerando que o presente estudo tem por finalidade, de um lado, avaliar a influência da temperatura de prensagem nas propriedades dos painéis compósitos e, de outro, classificar os painéis obtidos à luz dos requisitos estabelecidos em documentos normativos nacionais e internacionais, tornou-se metodologicamente necessário estratificar a literatura segundo o seu grau de aderência a esses dois eixos centrais.

Essa estratificação foi baseada, fundamentalmente, em quatro dimensões analíticas. A primeira refere-se à centralidade da temperatura de prensagem como variável de processamento, isto é, ao grau em que esse parâmetro aparece explicitamente como fator experimental associado à variação das propriedades dos painéis. A segunda diz respeito à semelhança entre o material investigado nos artigos e o sistema compósito de interesse desta pesquisa, especialmente no que concerne à presença de partículas lignocelulósicas, resíduos poliméricos e diferentes tipos de ligantes ou agentes compatibilizantes. A terceira dimensão corresponde ao tipo de resposta analisada pelos autores, com ênfase nas propriedades físicas, mecânicas e, em alguns casos, térmicas ou de durabilidade que podem dialogar com critérios de desempenho normativo. Por fim, a quarta dimensão relaciona-se ao potencial de transferência dos resultados da literatura para a

discussão dos painéis produzidos nesta dissertação, sobretudo no que se refere à comparação com requisitos técnicos de classificação.

3.1.8.1 Grupo 1

A base consolidada deste grupo, conforme a Tabela 3, reúne nove tratamentos experimentais distribuídos em dois estudos voltados à produção de painéis compósitos lignocelulósicos com incorporação de material termoplástico e variação da temperatura de prensagem. Ainda que ambos utilizem o bagaço de cana-de-açúcar como principal componente lignocelulósico, a comparação entre os trabalhos exige cautela, uma vez que também variam o tipo de polímero empregado, o sistema ligante, a densidade nominal e as condições operacionais de prensagem. Em razão disso, a temperatura da prensa deve ser tratada como variável central da análise, sem desconsiderar a influência simultânea dos demais fatores de formulação e processamento.

Tabela 3 - Artigos do Grupo 1

Autores	Ano
Duran <i>et al.</i>	2025
Nogueira <i>et al.</i>	2022

Fonte: Elaboração do próprio autor.

No estudo de Duran *et al.* (2025), os painéis foram produzidos com incorporação de HDPE, sigla de high-density polyethylene, isto é, polietileno de alta densidade. Trata-se de um polímero termoplástico amplamente utilizado em embalagens rígidas, recipientes, tubulações e diversos produtos industriais, caracterizado por maior densidade, maior rigidez e menor ramificação molecular quando comparado a outras formas de polietileno. Em sistemas compósitos lignocelulósicos, o HDPE pode contribuir para o aumento da resistência à umidade e para a modificação da resposta mecânica do painel, embora sua eficiência dependa diretamente das condições de prensagem e da capacidade de integração entre a fase polimérica, as partículas vegetais e o ligante utilizado.

No referido estudo, os ensaios físicos e mecânicos foram conduzidos com base na ASTM D1037, enquanto a interpretação do potencial de aplicação foi associada à ISO 16893:2016, utilizada pelos autores como referência para classificação funcional dos painéis em condições de uso seco. Os resultados mostram que, nos painéis híbridos contendo 20% de HDPE, a elevação da temperatura de prensagem de 100 para 200 °C esteve associada a aumento progressivo do módulo

de elasticidade, do módulo de ruptura e da ligação interna, ao mesmo tempo em que ocorreu redução do inchamento em espessura após 24 horas de imersão. Nessa série, o MOE aumentou de 1768 para 2674 MPa, o MOR de 14,15 para 25,04 MPa, a IB de 0,23 para 0,67 MPa e o TS 24 h diminuiu de 19,02 para 13,14%. Esse comportamento sugere que a elevação da temperatura favoreceu a consolidação interna da chapa e melhorou a interação entre o bagaço de cana, o HDPE e o poliuretano à base de óleo de mamona, refletindo positivamente nos parâmetros determinados segundo a ASTM D1037 e no enquadramento funcional indicado pela ISO 16893:2016.

A comparação entre o painel controle B100, sem adição de polímero, e o painel BP100, contendo 20% de HDPE, ambos prensados a 100 °C, evidencia que a simples incorporação do polietileno de alta densidade não garante, por si só, melhoria global do desempenho. Embora tenha havido discreto aumento da rigidez, observou-se redução do módulo de ruptura, queda acentuada da ligação interna e aumento do inchamento em espessura. À luz dos critérios utilizados pelos autores com base na ISO 16893:2016, essa formulação não apresentou desempenho suficiente sequer para enquadramento em mobiliário seco. Tal resultado indica que o efeito do HDPE não pode ser compreendido isoladamente, pois sua contribuição está condicionada ao regime térmico adotado e à capacidade desse regime de promover coesão interna, redistribuição do polímero e redução de discontinuidades na estrutura do painel.

No estudo de Nogueira *et al.* (2022), o polímero empregado foi o LDPE, sigla de low-density polyethylene, ou polietileno de baixa densidade, material termoplástico de menor densidade e maior flexibilidade em comparação ao HDPE. As propriedades mecânicas e físicas dos painéis foram avaliadas com base em diferentes referenciais normativos: os valores de MOE e MOR foram obtidos segundo a DIN 52362, enquanto os ensaios de ligação interna (IB), inchamento em espessura em 24 horas (TS 24 h) e absorção de água em 24 horas (WA 24 h) foram relacionados à ABNT NBR 14810-2, sendo a apreciação global do desempenho feita em conformidade com a ABNT NBR 14810. Os resultados indicaram que a elevação da temperatura de prensagem de 160 para 220 °C produziu melhora mais evidente nas propriedades físicas do que nas propriedades mecânicas. A absorção de água em 24 horas reduziu de 132,5 para 101,8%, o inchamento em espessura diminuiu de 14,7 para 9,3% e a densidade medida aumentou de 592 para 609 kg/m³. Em contrapartida, o módulo de elasticidade apresentou variação reduzida ao longo da faixa térmica, o módulo de ruptura aumentou apenas de forma modesta e a ligação interna permaneceu em patamar baixo em todas as formulações.

Esse comportamento demonstra que, no sistema analisado por Nogueira *et al.* (2022), o aumento da temperatura favoreceu a compactação do painel e reduziu sua suscetibilidade à absorção de água e ao inchamento, o que se reflete diretamente nos resultados de TS e WA

avaliados à luz da ABNT NBR 14810-2. Entretanto, essa melhoria física não foi acompanhada por ganho proporcional de coesão interna, já que os valores de IB permaneceram insuficientes para atendimento integral ao conjunto normativo considerado pelos autores. Em consequência, mesmo quando determinadas formulações apresentaram desempenho satisfatório em MOR, MOE ou TS 24 h, o enquadramento final continuou apenas parcial em relação à ABNT NBR 14810, sobretudo em razão da persistente limitação da resistência à tração perpendicular.

A leitura conjunta dos dois estudos permite afirmar que a temperatura de prensagem exerceu influência consistente sobre a estabilidade dimensional dos painéis, ainda que a resposta mecânica tenha variado conforme o sistema compósito adotado. Tanto nos resultados avaliados segundo a ASTM D1037 e interpretados com base na ISO 16893:2016, no caso de Duran *et al.* (2025), quanto naqueles confrontados com a DIN 52362 e a ABNT NBR 14810-2, no caso de Nogueira *et al.* (2022), verifica-se tendência de redução do inchamento em espessura com o aumento da temperatura. Quando disponível, como no estudo de Nogueira *et al.* (2022), a absorção de água também decresceu progressivamente, reforçando a hipótese de que temperaturas mais elevadas favorecem a densificação do painel e o fechamento de sua estrutura interna.

Entretanto, o comportamento mecânico não foi uniforme. O sistema composto por bagaço de cana, HDPE e poliuretano à base de óleo de mamona, estudado por Duran *et al.* (2025), apresentou melhora expressiva em MOE, MOR e IB, alcançando enquadramento em uso estrutural seco, em algumas formulações, segundo a ISO 16893:2016. Em contraste, o sistema composto por bagaço de cana, LDPE e resina ureia-formaldeído, analisado por Nogueira *et al.* (2022), apresentou ganhos mais limitados, sobretudo na IB, mesmo quando os valores de MOR, MOE e TS 24 h se mostraram compatíveis, de forma parcial, com os critérios da ABNT NBR 14810. Esse contraste evidencia que a temperatura, embora relevante, não atua de forma isolada, devendo ser interpretada em associação com o tipo de polímero, o sistema ligante, a densidade, a arquitetura interna do painel e a eficiência de compactação obtida no ciclo de prensagem.

Sob a ótica normativa, os resultados indicam que a elevação da temperatura pode ser decisiva para aproximar os compósitos dos requisitos de desempenho exigidos para aplicação prática, mas não assegura, de maneira automática, conformidade plena. Em Duran *et al.* (2025), as formulações BP175 e BP200 alcançaram enquadramento para uso estrutural seco com base na ISO 16893:2016, enquanto BP150 permaneceu compatível com mobiliário seco. Em Nogueira *et al.* (2022), embora a condição de 220 °C tenha apresentado o melhor equilíbrio entre propriedades físicas e mecânicas, o atendimento integral à ABNT NBR 14810 não foi alcançado, sobretudo em razão da limitação da ligação interna. Assim, a temperatura de prensagem se confirma como variável estratégica para o desempenho de painéis compósitos lignocelulósicos, mas sua

interpretação deve permanecer vinculada às exigências específicas de cada norma de referência e às características materiais de cada formulação.

3.1.8.2 Grupo 02

A análise do Grupo 2, na Tabela 4, evidencia que a interpretação da temperatura de prensagem não pode ser feita de maneira autônoma, como se os sistemas de painéis fossem diretamente comparáveis entre si. O conjunto examinado reúne painéis particulados convencionais, compósitos madeira-plástico, painéis reforçados com scrim mineral, sistemas com resinas amino, poliuretanos, matrizes termoplásticas e adesivos biobased, além de estudos em que sequer há prensagem quente convencional, como em Ohijeagbona *et al.* (2020) e Wahane *et al.* (2023). Nesse cenário, a temperatura deixa de operar como variável isolada e passa a integrar um arranjo processual mais amplo, em que densidade, natureza da fase ligante, tipo de resíduo incorporado e estratégia de consolidação interferem simultaneamente no desempenho final. Por isso, as correlações globais entre temperatura e propriedades mostraram baixo poder interpretativo para MOE e TS 24 h e comportamento contraditório para IB, WA 24 h e densidade, o que sugere predominância de confundimento estrutural entre os estudos, e não um efeito térmico linear universal (Jiang; Lu, 2017; Lyutyy *et al.*, 2018; Kramár *et al.*, 2020; Cazella *et al.*, 2024; Iswanto *et al.*, 2024).

Tabela 4 - Artigos do Grupo 2

Autores	Ano
Iswanto <i>et al.</i>	2024
Güler <i>et al.</i>	2024
Cazella <i>et al.</i>	2024
Wahane <i>et al.</i>	2023
Rodrigues <i>et al.</i>	2023
Ohijeagbona <i>et al.</i>	2020
Lamaming <i>et al.</i>	2020
Kramár <i>et al.</i>	2020
Ismail <i>et al.</i>	2018
Lyutyy <i>et al.</i>	2018
Jiang e Lu	2017

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Quando a análise se desloca da base agregada para o interior dos estudos, a densidade passa a apresentar sinal mais estável. Em diferentes sistemas, o aumento da densidade acompanhou maior rigidez e, em parte dos casos, maior resistência à flexão, o que foi especialmente nítido em

Cazella *et al.* (2024), Kramár *et al.* (2020), Güler *et al.* (2024) e Iswanto *et al.* (2024). Ainda assim, a relação entre densidade e estabilidade dimensional não foi uniforme. Em painéis com PET reciclado e CPUR, maior densificação esteve associada à redução de TS e WA, o que sugere melhor compactação e coesão interfacial da estrutura interna (Cazella *et al.*, 2024). Em contrapartida, parte das formulações lignocelulósicas com casca de amêndoa apresentou elevação do inchamento mesmo em condições de maior densidade, o que aponta para a persistência de tensões internas e para a influência da higroscopicidade do material alternativo sobre a recuperação do colchão após imersão (Güler *et al.*, 2024). Em termos práticos, isso significa que densidade elevada pode favorecer a resposta mecânica, mas não garante, por si só, melhor comportamento físico.

O efeito da natureza do material alternativo foi igualmente decisivo. O PET reciclado, quando empregado em associação ao CPUR, mostrou comportamento tecnicamente favorável, com ganhos simultâneos de MOR, MOE e IB, acompanhados por forte redução de TS e WA, inclusive em níveis de substituição relativamente elevados (Cazella *et al.*, 2024). No sistema MUF com BPUP, a adição do prepolímero bloqueado também produziu resposta positiva, culminando em formulações aptas a enquadramento superior na EN 312, o que sugere que modificações do sistema ligante podem ser mais eficazes do que a simples substituição da fração lignocelulósica (Jiang; Lu, 2017). Em direção oposta, o aumento da participação de PS em substituição ao PUR comprometeu o desempenho global dos painéis produzidos com resíduos de *Pinus* e *Eucalyptus*, revelando que a presença de um componente polimérico reciclado não é, em si, condição suficiente para melhorar o material, sobretudo quando a continuidade da fase adesiva é prejudicada (Rodrigues *et al.*, 2023). Situação análoga foi observada em Güler *et al.* (2024), em que o aumento expressivo da casca de amêndoa levou à deterioração progressiva das propriedades mecânicas.

O sistema ligante, por sua vez, mostrou-se determinante para o balanço entre coesão interna e estabilidade dimensional. As amino-resinas e o sistema amido/PVA foram capazes de gerar resistência mecânica compatível com referenciais normativos em determinadas condições, mas mantiveram limitações em inchamento, o que ficou claro em Lamaming *et al.* (2020) e Kramár *et al.* (2020). Já os poliuretanos e sistemas com forte participação termoplástica apresentaram melhor equilíbrio entre resistência e comportamento hídrico, com destaque para Cazella *et al.* (2024). Em sentido diverso, o adesivo ácido cítrico-sacarose, embora relevante sob a perspectiva de emissão e sustentabilidade, não sustentou desempenho físico-mecânico equivalente ao do sistema ULEF-UF nas formulações de Iswanto *et al.* (2024), ainda que o estudo tenha mostrado contribuição expressiva quanto à retardância à chama. Isso revela que a substituição de adesivos sintéticos por

sistemas integralmente biobased ainda depende de avanço tecnológico para evitar penalização simultânea de rigidez, resistência e estabilidade.

O exame normativo reforça essa leitura. A conformidade mais robusta do grupo concentrou-se em Jiang e Lu (2017), Ismail *et al.* (2018) e, sobretudo, em Cazella *et al.* (2024). Lamaming *et al.* (2020) e Kramár *et al.* (2020) demonstram que o atendimento mecânico parcial ou mesmo elevado não resolve, por si só, a viabilidade normativa quando a estabilidade dimensional permanece inadequada. Em Rodrigues *et al.* (2023), a melhor formulação foi justamente aquela sem substituição de PUR por PS, o que indica que a economia de ligante ou a valorização de resíduo polimérico não pode ser perseguida à custa da perda de desempenho estrutural. Em Lyutyy *et al.* (2018), a incorporação de EPS e a laminação mostraram potencial de melhoria, mas ainda sob enquadramento parcial. Em síntese, os estudos convergem no sentido de que a viabilidade técnica do painel não decorre apenas da incorporação de resíduos, mas da qualidade da interface formada entre partículas, ligante e fase alternativa.

Dessa forma, a principal contribuição deste grupo para a dissertação não está em definir uma temperatura ótima universal, mas em demonstrar que o efeito da temperatura é mediado pelo sistema material e pelo regime de consolidação. A variável deve permanecer central na análise integrada, porém sempre acompanhada de controles explícitos de densidade, teor e tipo de ligante, material alternativo, percentual de substituição e tratamento. Sem esse controle, a leitura do efeito térmico corre o risco de confundir condição de prensagem com identidade tecnológica do painel, produzindo generalizações frágeis e metodologicamente imprecisas (Jiang; Lu, 2017; Kramár *et al.*, 2020; Rodrigues *et al.*, 2023; Cazella *et al.*, 2024; Iswanto *et al.*, 2024).

3.1.8.3 Grupo 3

Os 10 artigos reunidos no Grupo 3, conforme Tabela 5, situam-se em uma zona intermediária da literatura sobre painéis compósitos lignocelulósicos, pois permanecem vinculados ao aproveitamento de resíduos e materiais alternativos, mas deslocam o foco analítico para problemas de formulação, processamento e desempenho global do painel. Essa característica impõe uma distinção metodológica importante: embora a temperatura de prensagem seja um parâmetro central para a interpretação do grupo, ela raramente aparece como variável isolada. Na maior parte dos estudos, a temperatura permanece fixa, está ausente do registro experimental ou se encontra embutida em rotas de fabricação não diretamente equivalentes, como se observa ao comparar Górski *et al.* (2022), Lu *et al.* (2021), Mirski *et al.* (2020) e Yang *et al.* (2024).

Tabela 5 - Artigos do Grupo 3

Autores	Ano
Rofdi <i>et al.</i>	2024
Yang <i>et al.</i>	2024
Li <i>et al.</i>	2024
Başboğa <i>et al.</i>	2023
Górski <i>et al.</i>	2022
Lu <i>et al.</i>	2021
Mirski <i>et al.</i>	2020
Yusof <i>et al.</i>	2020
Battegazzore <i>et al.</i>	2017
Klímek <i>et al.</i>	2016

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Dentro desse conjunto, a evidência mais clara sobre a influência da temperatura de prensagem foi produzida por Rofdi *et al.* (2024). No experimento em que a densidade nominal foi mantida em 600 kg/m³ e o teor de EPS em 20%, a elevação da temperatura de 130 para 180 °C promoveu aumento simultâneo de MOE, MOR e IB, acompanhado de forte redução do inchamento em 24 h. O comportamento é coerente com a natureza do sistema estudado, no qual o EPS reciclado atua como fase ligante termoplástica. Em faixas térmicas mais elevadas, o material tende a apresentar maior amolecimento, melhor molhamento das partículas lignocelulósicas e consolidação mais eficiente da estrutura do painel, o que favorece o ganho mecânico e reduz a penetração de água. Ainda assim, a generalização desse resultado para todo o grupo seria metodologicamente imprópria, porque os demais estudos não reproduzem o mesmo arranjo experimental.

Quando a temperatura deixa de ser o fator comparável e a densidade passa a ocupar essa posição, o grupo revela uma tendência clássica, mas não linear. Em Rofdi *et al.* (2024), o aumento da densidade de 500 para 700 kg/m³, sob temperatura constante de 180 °C e teor fixo de EPS, elevou as propriedades mecânicas, mas também produziu aumento do TS_{24h}. Esse resultado sugere que o adensamento melhora o contato interpartículas e a transferência de tensões, mas pode intensificar tensões internas recuperáveis após a imersão. A literatura do grupo, portanto, não autoriza tratar densidade apenas como variável positiva; ao contrário, ela participa de um compromisso estrutural entre resistência e estabilidade dimensional.

A escolha da madeira, do material alternativo e da arquitetura interna do painel também se mostrou decisiva. Em Mirski *et al.* (2020), a utilização de cavacos e serragem de serraria em painéis tricamada demonstrou que a viabilidade técnica do resíduo depende da proporção entre cavacos e serragem, da estrutura da seção transversal e da granulometria das camadas externas. O

simples aproveitamento do subproduto não garante desempenho satisfatório; o arranjo interno do painel é determinante para MOR, MOE, IB e resposta hídrica. Resultado análogo, embora por outra via experimental, foi obtido por Li *et al.* (2024), que demonstraram, em painéis tubulares tricamada, que o desempenho depende do ajuste combinado entre teor de finos, razão superficial e diâmetro tubular. Em ambos os casos, o efeito da composição só se torna inteligível quando associado à arquitetura do painel.

Nos estudos em que o material alternativo atua mais diretamente sobre a interface adesiva, a compatibilidade físico-química foi o fator dominante. Başboğa *et al.* (2023) mostraram que o resíduo de papel melamínico impregnado não se comporta da mesma forma em todas as granulometrias; a fração fina produziu o melhor equilíbrio entre propriedades mecânicas e físicas, o que indica maior eficiência de distribuição e de interação com a matriz. Klímek *et al.* (2016), por sua vez, demonstraram que o PET residual sem tratamento compromete fortemente a eficiência mecânica do painel, mas que a ativação por plasma pode recuperar parte da adesão interfacial, sobretudo em MOR e IB. Em Yang *et al.* (2024), a casca de *Camellia oleifera* mostrou resposta distinta conforme o sistema ligante adotado: com MUF, o aumento da substituição reduziu o MOE e limitou o ganho em flexão; com pMDI, houve ganho consistente em IB e redução de TS_{24h} em alguns níveis de substituição, mas sem melhoria equivalente de MOE e MOR. Esses resultados indicam que o material alternativo não pode ser interpretado como variável homogênea, já que seu desempenho depende da forma de incorporação, da morfologia da partícula e da química do ligante.

Nos painéis com maior participação de fase polimérica, a melhoria da estabilidade hídrica foi um resultado recorrente, mas não universalmente acompanhada de superioridade mecânica. Górski *et al.* (2022) observaram que o aumento do teor de plástico reduziu monotonicamente o inchamento e a absorção de água, o que confirma a contribuição hidrofóbica dos termoplásticos. Contudo, a resposta mecânica variou com o tipo de polímero, e a usinabilidade também se alterou de modo não trivial. Em Rofdi *et al.* (2024), o aumento do teor de EPS, sob densidade e temperatura controladas, elevou MOE, MOR e IB e reduziu TS_{24h}, sugerindo que, naquele sistema, a quantidade de ligante reciclado ainda era insuficiente nas menores proporções. Essa convergência parcial entre os dois estudos reforça a hipótese de que fases poliméricas podem beneficiar a estabilidade dimensional, mas o resultado mecânico final depende da eficiência de ligação e da conformação interna do painel.

O teor de ligante e o sistema adesivo, portanto, não admitem leitura linear. Em Yusof *et al.* (2020), o melhor desempenho foi obtido com uma formulação intermediária contendo NaCl, PVOH e ácido cítrico, e não com o maior teor total de aditivos. Em Yang *et al.* (2024), a

comparação entre pMDI e MUF mostrou que o primeiro aumentou sistematicamente o IB, mas com custo em TS_24h. Em Klímek *et al.* (2016), o tratamento superficial do PEt alterou a eficiência do sistema adesivo sem que houvesse modificação do adesivo principal. Isso indica que o teor nominal de ligante, por si só, explica pouco; o que importa é a interação entre química adesiva, tratamento superficial, área de contato e distribuição da fase alternativa.

Do ponto de vista normativo, o grupo oferece um quadro promissor, porém ainda incompleto. Em Başboğa *et al.* (2023), parte das formulações alcançou níveis mecânicos satisfatórios, mas o inchamento em 24 h e a emissão de formaldeído impediram o atendimento integral. Em Rofdi *et al.* (2024), uma formulação aproximou-se do enquadramento de referência, mas o MOR permaneceu abaixo do limiar mínimo. Nos demais estudos, a ausência de classe normativa explícita, de espessura de referência ou de conjunto completo de propriedades inviabiliza a comprovação formal de conformidade. Assim, o grupo demonstra viabilidade técnica em múltiplas rotas, mas ainda carece de padronização suficiente para sustentar generalizações normativas amplas.

Os estudos deste grupo mostram que o desempenho de painéis compósitos produzidos com resíduos lignocelulósicos, polímeros reciclados ou sistemas híbridos depende de uma combinação estreita entre temperatura, densidade, arquitetura do painel, granulometria, tratamento superficial e química do ligante. A temperatura de prensagem mostrou efeito decisivo apenas quando o desenho experimental permitiu isolá-la, como em Rofdi *et al.* (2024). Nos demais casos, o comportamento resultou da interação entre fatores, de modo que a interpretação técnica mais consistente não é a de causalidade simples, mas a de compromisso estrutural entre resistência mecânica, estabilidade dimensional e viabilidade de processamento. Para fins de dissertação, essa é a conclusão mais robusta: o avanço no uso de resíduos não depende apenas da substituição de matéria-prima, mas da capacidade de ajustar, de forma integrada, composição, processo e estrutura interna do painel, conforme evidenciado por Başboğa *et al.* (2023), Klímek *et al.* (2016), Li *et al.* (2024), Mirski *et al.* (2020), Rofdi *et al.* (2024) e Yang *et al.* (2024).

3.1.8.4 Grupo 4

O Grupo 4 reúne 16 artigos, conforme a Tabela 6, que só se tornam plenamente inteligíveis quando se reconhece a presença de uma fase plástica efetiva na arquitetura do painel. Não se trata, portanto, de uma variação marginal dos painéis particulados convencionais, mas de um conjunto de sistemas compósitos em que a resposta final decorre da interação entre madeira ou outro reforço lignocelulósico, matriz polimérica, compatibilizante, aditivo funcional e rota de conformação.

Essa heterogeneidade é nítida quando se colocam lado a lado os WPC prensados com HDPE reciclado de Sommerhuber *et al.* (2015), os sistemas com retardantes de chama de Schirp e Su (2016), os compósitos com plásticos de WEEE e particleboard reciclado de Sommerhuber *et al.* (2016), os sistemas com fillers minerais de Srivabut *et al.* (2018), os compósitos com termoplásticos pós-consumo de Martinez Lopez *et al.* (2020a), os compósitos baseados em EPS residual de Bollakayala *et al.* (2022), os estudos de compatibilidade, fibra de coco e fuligem reciclada de Bollakayala *et al.* (2023a; 2023b; 2023c), os compósitos irradiados de Mohd Yunus e Mohammad (2022), os sistemas com lignina e nanolignina de Younesi-Kordkheili e Pizzi (2023), os compósitos serragem-rPET/PHBV de Hosseini *et al.* (2024) e os UFWPC de Yang *et al.* (2025).

Tabela 6 - Artigos do Grupo 4

Autores	Ano
Yang <i>et al.</i>	2025
Hosseini <i>et al.</i>	2024
Bollakayala <i>et al.</i>	2023b
Bollakayala <i>et al.</i>	2023a
Bollakayala <i>et al.</i>	2023c
Younesi-Kordkheili e Pizzi	2023
Bollakayala <i>et al.</i>	2022
Mohd Yunus e Mohammad	2022
Martinez Lopez <i>et al.</i>	2021
Martinez Lopez <i>et al.</i>	2020b
Martinez Lopez <i>et al.</i>	2020a
Tascioglu <i>et al.</i>	2018
Srivabut <i>et al.</i>	2018
Sommerhuber <i>et al.</i>	2016
Schirp e Su	2016
Sommerhuber <i>et al.</i>	2015

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nesse conjunto, a temperatura de prensagem deve ser interpretada como variável central, porém não autônoma. A maior parte dos estudos concentra-se entre 160 e 190 °C, com poucos casos fora dessa faixa. Ainda assim, o efeito térmico não pode ser isolado com segurança, porque quase todos os trabalhos mantiveram temperatura fixa enquanto variavam composição, tipo de polímero, teor de madeira, compatibilização ou aditivação. A única exceção clara no subconjunto hot press é Martinez Lopez *et al.* (2021), que empregaram 150, 180 e 250 °C em chapas contendo madeira e termoplásticos reciclados associados a UF. Mesmo nesse caso, embora a variação térmica tenha coexistido com diferenças de densidade e IB, todos os resultados permaneceram

acima do limiar mínimo de ligação interna indicado pelos autores, sem que emergisse um padrão monotônico suficientemente consistente para atribuir à temperatura um papel causal isolado.

A leitura comparativa dos estudos confirma essa limitação. A 180 °C, Yang *et al.* (2025) obtiveram contrastes muito expressivos entre HDPE e MAPE, mantido o mesmo teor de madeira, demonstrando que a eficiência da interface foi mais determinante que o nível térmico. A 190 °C, Hosseini *et al.* (2024) mostraram que a natureza da fase plástica alterou profundamente o desempenho: a formulação com PHBV apresentou o melhor resultado global, enquanto a introdução de borracha de pneu penalizou a resistência. Na mesma faixa térmica, Srivabut *et al.* (2018) verificaram respostas distintas conforme o filler fosse nanoclay, talco ou carbonato de cálcio. Em 160 °C, Bollakayala *et al.* (2022) evidenciaram que teores de 20 e 30 wt.% de EPS foram insuficientes para consolidar o painel, ao passo que formulações com 40 e 50 wt.% já se tornaram viáveis, sobretudo a composição 50/50. Assim, a temperatura de prensagem participa do desempenho, mas a sua influência efetiva só se materializa quando o sistema possui janela reológica e interfacial compatível.

A densidade, por sua vez, apresentou papel relevante, embora igualmente condicionado pela composição. Em termos agregados, densidades mais elevadas tenderam a acompanhar maiores valores de MOE, MOR e IB. Essa associação é coerente com o que se observa em Sommerhuber *et al.* (2016), cujos sistemas à base de ABS reciclado de WEEE alcançaram rigidez e resistência muito superiores às formulações em PS, especialmente quando combinados com SMA. Também em Yang *et al.* (2025), os UFWPC com MAPE associaram alta densidade a desempenho mecânico notavelmente superior ao das formulações equivalentes em HDPE. Todavia, a densidade não garantiu, por si só, bom desempenho físico. Em Yang *et al.* (2025), o sistema 95HD exibiu elevada rigidez, mas apresentou WA e TS muito elevadas, ao passo que o sistema 95MA, sob a mesma temperatura e com teor polimérico igualmente reduzido, mostrou balanço muito mais favorável. O dado decisivo não foi a densidade isolada, mas o grau de ligação interfacial.

A madeira empregada e o material alternativo utilizado também atuaram de forma relacional, não absoluta. Em Martinez Lopez *et al.* (2020a), a serragem de *Cedrela odorata* combinada com mistura reciclada de PET, HDPE e PP forneceu compósitos de baixa WA e TS quando a fração termoplástica foi suficientemente alta e o teor de CaCO₃ permaneceu moderado. Em Sommerhuber *et al.* (2016), spruce e particleboard reciclado mostraram-se tecnicamente viáveis como fração lignocelulósica em matrizes provenientes de WEEE, especialmente nos sistemas ABS com SMA. Em Schirp e Su (2016), a pré-modificação da farinha de madeira e a introdução de retardantes de chama halogen-free alteraram simultaneamente o comportamento ao

fogo, a absorção de água e a resposta mecânica, revelando que o desempenho do compósito depende da forma como a fase lignocelulósica é integrada ao sistema, e não apenas da espécie utilizada.

O percentual e o tipo de substituição mostraram comportamento nitidamente não linear. Em Bollakayala *et al.* (2023b), a fibra de coco melhorou MOE e MOR até cerca de 3 wt.%, mas teores superiores reduziram as propriedades mecânicas, embora continuassem a diminuir a absorção de água. Em Bollakayala *et al.* (2023c), a fuligem veicular reciclada reduziu progressivamente a WA, mas o melhor desempenho mecânico concentrou-se em torno de 1,0 wt.%, acima do qual surgiram perdas de resistência. Em Srivabut *et al.* (2018), a introdução de talco e carbonato de cálcio em níveis moderados elevou MOR e, em certos casos, também MOE, enquanto níveis mais altos de nanoclay melhoraram WA e TS às custas de parte do desempenho mecânico. Em Younesi-Kordkheili e Pizzi (2023), a substituição parcial por lignina e, sobretudo, por nanolignina produziu ganho simultâneo de MOE, MOR e estabilidade hídrica, com superioridade clara da nanolignina nas faixas intermediárias e elevadas. O padrão dominante, portanto, não é o de ganho linear com aumento de aditivo, mas o de existência de um teor ótimo dependente da dispersão e da compatibilidade interfacial.

O sistema ligante e, mais especificamente, a natureza da interface madeira-polímero, emergem como a variável mais consistente do grupo. Sommerhuber *et al.* (2015) já haviam mostrado que o emprego de MAPE permitia preservar desempenho relativamente próximo entre formulações virgens e recicladas, sobretudo em menor teor de madeira. Schirp e Su (2016) e Srivabut *et al.* (2018) trabalharam com MAPP em sistemas de PP reciclado, observando melhora do balanço entre desempenho mecânico e estabilidade, ainda que influenciada pelos retardantes ou fillers empregados. Sommerhuber *et al.* (2016) evidenciaram ganhos importantes com SMA em matrizes PS e ABS derivadas de WEEE. Younesi-Kordkheili e Pizzi (2023) demonstraram que a nanolignina pode atuar como bioagente de acoplamento mais eficiente que a lignina convencional. Mohd Yunus e Mohammad (2022), em outra direção, revelaram que a sequência de irradiação e o uso de TMPTA modificam a resposta do compósito ao envelhecimento, mostrando que a interface também pode ser controlada por vias reativas. Yang *et al.* (2025), por fim, ofereceram a demonstração mais contundente do grupo: em condições térmicas equivalentes, o MAPE superou amplamente o HDPE em UFWPC com 85%, 90% e 95% de madeira, inclusive em IB, MOR, WA e TS.

Os trade-offs entre propriedades mecânicas e físicas atravessam praticamente toda a literatura do grupo. Aumento de madeira ou de reforço lignocelulósico tende a favorecer rigidez, mas pode ampliar a suscetibilidade hídrica quando o encapsulamento é insuficiente, como sugerem

Sommerhuber *et al.* (2015) e Yang *et al.* (2025). A elevação da fração polimérica pode reduzir WA e TS, como em Martinez Lopez *et al.* (2020a), mas nem sempre maximiza MOR. Fillers e aditivos funcionais podem melhorar simultaneamente várias propriedades em determinada faixa, mas, acima de certo teor, passam a induzir aglomeração, deficiência de molhabilidade ou perda de continuidade da matriz, como se vê em Srivabut *et al.* (2018), Bollakayala *et al.* (2023b) e Bollakayala *et al.* (2023c). O melhor desempenho técnico decorre, assim, de um equilíbrio entre fração plástica suficiente, interface ativa, densificação controlada e nível moderado de aditivação.

Do ponto de vista normativo, o grupo ainda apresenta forte limitação de comparabilidade. Apenas Hosseini *et al.* (2024) e Martinez Lopez *et al.* (2021) permitiram verificação objetiva frente a limiares explicitados no próprio material extraído. Em Hosseini *et al.* (2024), duas formulações atenderam ao critério ANSI de MOR para MDF de uso interno, enquanto duas não o atenderam. Em Martinez Lopez *et al.* (2021), todas as formulações superaram o mínimo de IB informado pelos autores. Nos demais estudos, a norma reportada serviu predominantemente como referência metodológica de ensaio. Isso impede generalizações normativas mais amplas, ainda que vários resultados técnicos sejam promissores sob a ótica aplicada.

A viabilidade técnica do grupo, portanto, é real, mas seletiva. As formulações mais promissoras concentram-se naquelas em que a compatibilização interfacial é efetiva e a fração plástica é suficiente para consolidar o painel sem comprometer excessivamente a participação lignocelulósica. Nessa direção, destacam-se o compósito ABS/SMA com carga lignocelulósica reciclada de Sommerhuber *et al.* (2016), as formulações otimizadas de Cedrela com termoplásticos pós-consumo de Martinez Lopez *et al.* (2020a), o sistema com nanolignina de Younesi-Kordkheili e Pizzi (2023), a formulação com PHBV de Hosseini *et al.* (2024) e, sobretudo, os UFWPC com MAPE de Yang *et al.* (2025). Em sentido oposto, composições com baixo teor efetivo de matriz, excesso de filler ou interface insuficiente tendem a perder desempenho mecânico, estabilidade física ou ambos, como se verificou em Bollakayala *et al.* (2022), em parte dos sistemas de Srivabut *et al.* (2018) e nas formulações HDPE de ultra-alto teor de madeira em Yang *et al.* (2025).

3.1.8.5 Grupo 5

A análise conjunta dos estudos pertencentes ao Grupo 5, conforme a Tabela 7, demonstra que a temperatura de prensagem constitui variável tecnologicamente relevante, embora não suficiente, para explicar o desempenho dos painéis compósitos analisados. O comportamento observado não sustenta uma interpretação simplificada segundo a qual o aumento da temperatura, por si só, conduz à melhoria generalizada das propriedades físicas e mecânicas. Ao contrário, os

resultados indicam que a resposta do painel depende da interação entre o regime térmico, a reatividade do ligante, a densidade efetiva alcançada, a natureza do material alternativo e o grau de substituição empregado na formulação.

Tabela 7 - Artigos do Grupo 5

Autores	Ano
Łukawski <i>et al.</i>	2024
Masri <i>et al.</i>	2018
Nemec <i>et al.</i>	2025
Saražin <i>et al.</i>	2021
Wang <i>et al.</i>	2023
Gonçalves <i>et al.</i>	2021

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nos sistemas de prensagem a quente, a influência da temperatura aparece de forma mais evidente quando a comparação é feita dentro de um mesmo arranjo químico. Esse fenômeno pode ser observado em Saražin *et al.* (2021), estudo no qual a elevação da temperatura de 180 para 230 °C promoveu incremento substancial da resistência interna em painéis ligados com NIPU à base de lignina organossolve. O ganho foi consistente nas duas densidades testadas, indicando que a cura do adesivo depende fortemente do aporte térmico. Ainda assim, a própria pesquisa mostra que a variável térmica não atua isoladamente, pois a introdução de silano permitiu elevar o IB a patamar superior mesmo em temperatura inferior. Tal resultado indica que a eficiência do processamento decorre não apenas da intensidade térmica, mas da compatibilização química entre adesivo e substrato lignocelulósico, o que confere maior robustez à interface adesiva e favorece a consolidação do painel.

Situação distinta é observada em Nemec *et al.* (2025). Nesse estudo, a temperatura foi mantida constante em 180 °C, o que desloca o eixo interpretativo para a composição do ligante. A substituição progressiva da fração epóxi-poliéster por lignina kraft não resultou em melhoria linear do desempenho. Embora a formulação E20 tenha apresentado o melhor balanço entre rigidez, resistência e integridade interna, as formulações com maiores teores de lignina tenderam a apresentar redução de MOR e IB, acompanhada de elevação acentuada de TS e WA. Esse comportamento sugere que, nas condições adotadas, o sistema híbrido em pó não atingiu janela de cura e compatibilização suficientemente ampla para preservar o desempenho do painel em níveis próximos aos exigidos pelas normas de referência. A temperatura de 180 °C mostrou-se operacionalmente viável, mas insuficiente para neutralizar os efeitos negativos de substituições mais elevadas no sistema adesivo.

Em Łukawski *et al.* (2024), a prensagem ocorreu a 200 °C, em um sistema fenol-formaldeído modificado com nanoplaquetas de grafeno. O conjunto de resultados sugere que a maior temperatura, associada à elevada reatividade térmica da resina PF, contribuiu para a obtenção dos maiores valores de MOE e MOR entre os estudos com dados completos dessas propriedades. Todavia, a incorporação de GNP não produziu ganho mecânico. O efeito observado foi, predominantemente, de funcionalização: houve redução da resistência interna e da resistência à flexão em relação ao painel controle, mas, em contrapartida, o material adquiriu condutividade elétrica. Em termos tecnológicos, isso significa que a viabilidade do painel não deve ser julgada apenas por parâmetros estruturais clássicos, mas também pela função adicional pretendida no produto final.

Os estudos conduzidos sem temperatura numérica explícita de prensagem reforçam a necessidade de uma leitura mais ampla do processamento. Em Wang *et al.* (2023), a rota de cold pressing/self-forming permitiu produzir compósitos de palha de marigold e poliuretano com elevada resistência interna, mesmo sem aquecimento convencional reportado. A introdução de ácido fítico e quelato de ferro resultou em redução do IB em comparação ao controle, mas permaneceu em patamar superior ao mínimo citado na base, ao mesmo tempo em que elevou significativamente o desempenho frente ao fogo e à emissão de fumaça. A interpretação técnica desses resultados conduz à constatação de que, em certos sistemas, a viabilidade de aplicação não depende primariamente de maior rigidez ou resistência à flexão, mas da obtenção simultânea de segurança ao fogo, resistência interna satisfatória e rota de processamento energeticamente menos intensiva.

Em Masri *et al.* (2018), o compósito baseado em folíolos de tamareira e EPS residual representa outra lógica de desempenho. O material não se aproxima dos patamares mecânicos observados em painéis lignocelulósicos tradicionais de uso estrutural ou semiestrutural, mas se revela promissor como isolante térmico e como componente de painéis multicamadas. A ausência de temperatura numérica de prensagem não impede a leitura de que o aumento da fração de matriz e o ajuste da granulometria exerceram papel decisivo sobre a resistência do compósito. Nesse caso, o mecanismo dominante parece estar mais ligado à continuidade da fase polimérica e ao empacotamento do reforço vegetal do que a qualquer ativação térmica do processo.

O estudo de Gonçalves *et al.* (2021) não contribui diretamente para a comparação de MOE, MOR, IB, TS e WA, pois se concentra na resistência biológica de painéis MDP com resíduos agroindustriais. Ainda assim, sua inclusão é relevante porque demonstra que a discussão sobre viabilidade técnica não pode ser restrita ao desempenho mecânico ou à sustentabilidade da matéria-prima. Os resultados obtidos mostram que a incorporação de resíduos lignocelulósicos e

a própria escolha do sistema adesivo não impediram elevada suscetibilidade a determinados agentes xilófagos, especialmente *Trametes versicolor* e *Nasutitermes corniger*. Isso significa que o enquadramento tecnológico de painéis ambientalmente inovadores exige, além da análise físico-mecânica, a consideração da durabilidade biológica em função do uso final previsto.

Em perspectiva integrada, o Grupo 5 indica que a temperatura de prensagem funciona como variável de ativação do sistema, mas sua eficácia depende da compatibilidade entre ligante e substrato, do nível de densificação alcançado e da estabilidade do arranjo formulacional sob umidade. Quando a química adesiva é favorável, como no caso do PF de Łukawski *et al.* (2024) ou do NIPU termicamente adequadamente ativado em Saražin *et al.* (2021), a consolidação tende a ser mais eficiente. Quando a formulação introduz limitações de cura, coesão ou sensibilidade hídrica, como em parte das variantes de Nemec *et al.* (2025), o aumento da temperatura não é suficiente para assegurar desempenho normativo. Assim, a viabilidade técnica dos painéis do grupo não pode ser atribuída a um único fator de processamento, mas ao ajuste simultâneo entre composição, regime térmico, densidade e função de uso do material.

3.1.8.6 Grupo 6

A análise do Grupo 6 evidencia um conjunto bibliográfico situado nas margens do recorte central dos painéis compósitos lignocelulósicos. Embora todos os estudos mantenham alguma relação com madeira, compósitos, adesão ou materiais híbridos, o núcleo experimental é amplamente disperso. Parte expressiva dos trabalhos concentra-se em juntas coladas, revestimentos, linhas de cola, painéis de fachada, vigas compósitas, estruturas sanduíche, modelagem preditiva e avaliação sistêmica, como se verifica em Nečasová *et al.* (2015), Nečasová *et al.* (2020), Máchová *et al.* (2019), Ramachandrareddy *et al.* (2022), Autengruber *et al.* (2021), Wong *et al.* (2021), Torabi *et al.* (2021), Zheng *et al.* (2020) e Holzer *et al.* (2023). Em consequência, a variável temperatura de prensagem não atua de forma uniforme entre os artigos, o que inviabiliza tratá-la como eixo comparativo universal do grupo.

Tabela 8 - Artigos do Grupo 6

Autores	Ano
Hejna <i>et al.</i>	2025
Sun <i>et al.</i>	2019
Holzer <i>et al.</i>	2023
Yousefi <i>et al.</i>	2022
Ramachandrareddy <i>et al.</i>	2022
Autengruber <i>et al.</i>	2021
Torabi <i>et al.</i>	2021
Wong <i>et al.</i>	2021
Zheng <i>et al.</i>	2020
Nečasová <i>et al.</i>	2020
Mishra	2020
Yang <i>et al.</i>	2020
Sun <i>et al.</i>	2024
Máchová <i>et al.</i>	2019
Sommerhuber <i>et al.</i>	2017
Nečasová <i>et al.</i>	2015

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nos estudos mais próximos do escopo de compósitos e painéis, a temperatura assume papel eminentemente processual e dependente da formulação. Hejna *et al.* (2025) demonstram esse ponto de forma particularmente nítida ao investigar compósitos obtidos de resíduos de MDF e espuma flexível de poliuretano. Nas condições de 120 °C e 140 °C, a consolidação foi insuficiente e os corpos de prova não apresentaram resistência à flexão mensurável; a partir de 160 °C, o material passou a exibir integridade mecânica, com incremento adicional a 180 °C e 200 °C. O resultado não autoriza concluir que temperaturas mais elevadas sejam sempre benéficas, mas permite afirmar que existe um limiar térmico de consolidação, abaixo do qual a coesão interna não se estabelece adequadamente e acima do qual o ganho de resistência convive com risco crescente de degradação do sistema polimérico, conforme discutido por Hejna *et al.* (2025).

Em sistemas veneer/WPC, a influência térmica assume configuração distinta. Sun *et al.* (2019) mostraram que a elevação da temperatura de prensagem entre 70 °C e 90 °C favoreceu a ligação superficial entre lâmina de madeira e substrato WF-HDPE, mas a resposta final permaneceu condicionada à espécie da lâmina e ao tempo de prensagem. A condição ótima do estudo não correspondeu ao maior valor de temperatura, e sim ao arranjo de 80 °C por 20 min com technical wood, o que evidencia a natureza multivariada do processo de adesão. Já Sun *et al.* (2024), mantendo a temperatura em 80 °C, demonstraram que o preparo superficial pode ser ainda mais decisivo que o valor térmico isolado, uma vez que o scouring pad gerou interface superior

àquela obtida com abrasivos mais agressivos. Em termos tecnológicos, isso significa que a energia de superfície disponível, a continuidade da linha adesiva e o grau de exposição efetiva da madeira podem determinar o desempenho tanto quanto a condição térmica da prensagem.

A densidade e a composição também exerceram influência relevante, embora novamente de forma dependente do estudo. Sommerhuber *et al.* (2017) verificaram que o aumento do teor de madeira de 30% para 60% elevou a densidade e o MOE dos compósitos, reforçando a associação entre maior fração lignocelulósica e incremento de rigidez em matrizes termoplásticas. Contudo, o MOR não acompanhou esse comportamento de forma linear quando se compararam matérias-primas virgens e secundárias, o que indica interferência simultânea da origem da matéria-prima e da qualidade interfacial. Resultado semelhante, embora mais acentuado, aparece em Yang *et al.* (2020): o aumento de PWF ampliou o MOE até 7%, mas o melhor MOR ocorreu em 5%; posteriormente, a adição de partículas de Cu-Zn elevou o desempenho até 2%, seguida de queda nas dosagens superiores. O quadro sugere que, nesses compósitos, a melhoria mecânica depende de um ponto ótimo entre reforço, dispersão e compatibilidade, e não de crescimento indefinido da fase adicionada.

A interpretação física torna-se ainda mais clara quando se observam os dados de estabilidade hídrica. Em Yousefi *et al.* (2022), o aumento da fibra de casca de milho de 45% para 75%, sob temperatura fixa de 185 °C, elevou simultaneamente a absorção de água e o inchamento em espessura ao longo de 1500 h. Esse resultado expõe um trade-off clássico em compósitos lignocelulósicos: a ampliação da fração fibrosa pode favorecer certos atributos estruturais ou de sustentabilidade, mas tende a intensificar a sensibilidade à umidade quando o sistema de matriz e o acoplamento interfacial não são suficientes para restringir a difusão de água. A mesma lógica ajuda a compreender por que ganhos de rigidez observados em Sommerhuber *et al.* (2017) e Yang *et al.* (2020) não podem ser automaticamente convertidos em superioridade global do compósito.

O papel do ligante e do sistema ligante, por sua vez, mostrou-se decisivo sempre que reportado de forma comparável. Hejna *et al.* (2025) evidenciaram ganho claro de resistência com o aumento do teor de MDI, ao passo que a alteração da razão MDI:bicarbonato de amônio modificou o desempenho final do material. Nos estudos de adesão em revestimentos, Nečasová *et al.* (2015) e Nečasová *et al.* (2020) mostraram que o tipo de adesivo interfere diretamente na integridade da interface e no comportamento após exposição ambiental. Em Ramachandrareddy *et al.* (2022), as linhas de cola baseadas em UF exibiram estabilidade superior à dos sistemas PVAc sob diferentes classes de serviço, demonstrando que a escolha do adesivo não é variável acessória, mas componente central da resposta mecânica e higroscópica do sistema.

Do ponto de vista normativo, o grupo é pouco útil para uma classificação clássica de painéis, porque a maior parte das normas citadas corresponde a procedimentos de ensaio específicos ou a avaliações voltadas a adesão, estruturas e serviço ambiental. Apenas Sun *et al.* (2019) e Sun *et al.* (2024) permitem discussão mais objetiva de atendimento a critérios de ligação superficial e delaminação. Nos demais casos, a norma serve para definir como o ensaio foi conduzido, não para enquadrar o produto em uma categoria normativa final. Em termos de dissertação, isso significa que o Grupo 6 não deve sustentar generalizações sobre conformidade de painéis lignocelulósicos, mas sim ilustrar limites de comparabilidade e zonas de transição entre painéis, compósitos híbridos e estudos interfaciais.

4 METODOLOGIA

Neste item estão descritos os procedimentos metodológicos utilizados para produção dos painéis considerando-se a análise da variação da temperatura de prensagem.

4.1 DEFINIÇÃO DAS MISTURAS

As proporções dos materiais foram realizadas considerando-se a proposta de substituição de massa seca de madeira, ou seja, utilizou-se 65% de massa seca de partículas de *Pinus* spp., 25% de PET e 10% de PUR, totalizando 100% de materiais para produção de painéis, que foram prensados com dois níveis de temperatura, ou seja, 80 °C para a mistura 1 (M1) e 100 °C para a mistura 2 (M2), conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Composição da mistura utilizada para produção dos painéis

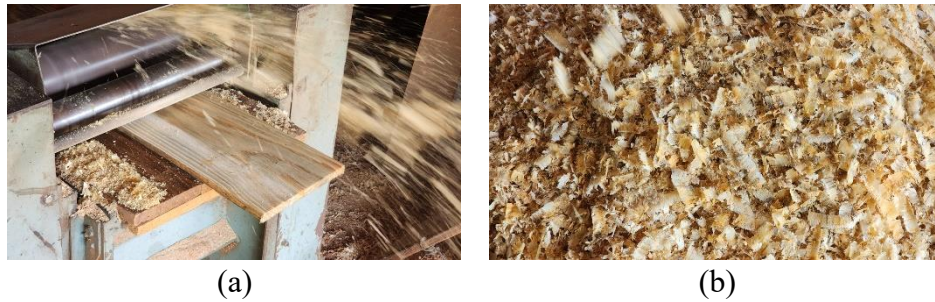
Componente	Material	Massa (%)
Partículas de madeira	<i>Pinus</i> spp.	65
Material reciclável	PET	25
Adesivo	Poliuretano à base de óleo de mamona (PUR)	10

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2 PRODUÇÃO E PROCESSAMENTO DE MARAVALHAS

A preparação das partículas de madeira foi iniciada com a obtenção de maravalhas, com dimensões variando entre 15 e 50 mm, produzidas por meio de uma plaina desgrossadeira, conforme Figura 9. Em seguida, essas maravalhas foram processadas em um moinho de facas equipado com peneira de abertura de 12 mm, resultando nas partículas empregadas na fabricação dos painéis – essa etapa foi simulada laboratorialmente para obter particulados na forma de resíduos madeireiros.

Figura 9 - Transformação da madeira em particulados: (a) plaina desengrossadeira e (b) maravalhas



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.3 CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS

A classificação granulométrica teve como objetivo eliminar as partículas com dimensões inferiores a 2 mm e superiores a 10 mm, visando otimizar o consumo de adesivo. Conforme Iwakiri e Trianoski (2020), partículas muito finas apresentam maior superfície específica, o que acarreta um aumento no consumo de adesivo.

Foi realizada a classificação granulométrica das partículas em um agitador elétrico de peneiras, utilizando-se malhas com aberturas dispostas em ordem decrescente: 6,36; 4,36; 2,36 e 1,18 mm, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Classificação granulométrica em um agitador elétrico de peneiras



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O processo de peneiramento foi empregado para determinar a distribuição granulométrica das partículas. O material foi submetido ao agitador elétrico de peneiras por um período de 7 minutos, possibilitando a separação por faixas de tamanho. As frações retidas nas peneiras com aberturas de 6,36; 4,36; 2,36 e 1,18 mm foram reunidas e homogeneizadas, sendo então utilizadas no ensaio de composição granulométrica, conduzido de acordo com as diretrizes da ABNT NBR NM 248 (2003).

4.4 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Concluída a etapa de separação, realizou-se um ensaio voltado à determinação da composição granulométrica das misturas, tomando como referência a ABNT NBR NM 248 (2003). Essa norma, originalmente empregada para avaliar a granulometria de agregados miúdos e grãos destinados ao concreto, foi adaptada para o contexto de partículas de madeira. Para a execução do procedimento, utilizou-se um conjunto de peneiras organizadas em sequência decrescente de abertura: 6,30 mm (1/4"), 4,76 mm (nº 4), 2,38 mm (nº 8), 1,19 mm (nº 16), 0,595 mm (nº 30) e 0,297 mm (nº 50), conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Conjunto de peneiras utilizadas para realização do ensaio para determinação da composição granulométrica



Fonte: Elaboração do próprio autor.

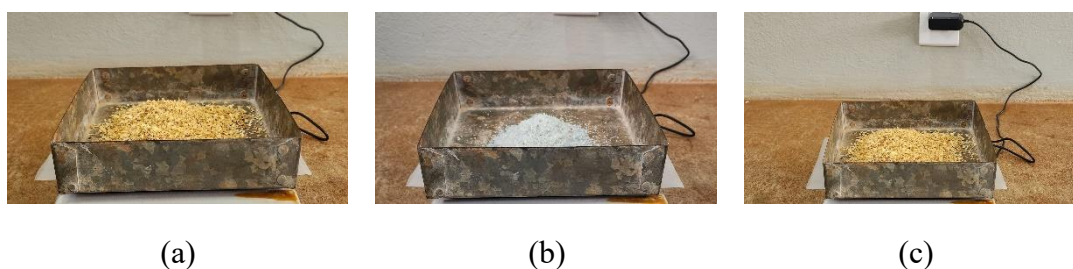
As partículas de *Pinus* spp. destinadas ao ensaio foram previamente secas em estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, até atingirem um teor de umidade próximo de 3%. Posteriormente, foram colocadas no

agitador de peneiras, ajustado para vibração no nível 4, durante um período de 15 minutos. Para cada composição mencionada, foram analisadas três amostras.

De acordo com a ABNT NBR NM 248 (2003), a massa mínima recomendada para uma amostra no ensaio de peneiramento é de 300 g. No entanto, esse requisito está associado a materiais com dimensões compatíveis com as malhas das peneiras utilizadas. Como as partículas de madeira apresentam massa específica e geometria distintas dos agregados convencionais utilizados em concreto, foi necessário adaptar o procedimento, adotando uma massa de amostra reduzida, limitada a 50 g, a fim de viabilizar a execução do ensaio de composição granulométrica.

Para avaliação da composição das partículas, foram ensaiadas 3 amostras, com 100% *Pinus* spp. (Figura 12. a), 100% PET (Figura 12.b) e 65% de *Pinus* spp. mais 25% PET (Figura 12.c).

Figura 12 - Material utilizado para avaliação da composição granulométrica das misturas: (a) *Pinus* spp., (b) PET e (c) *Pinus* spp. + PET



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com os valores de massa retida em cada peneira, foi possível determinar a porcentagem média retida e acumulada, além do módulo de finura, considerando aproximação de 0,01. Esse módulo, obtido a partir da análise granulométrica, permite verificar se as partículas se enquadram no intervalo recomendado de 2 a 6 mm, conforme especificado em normas técnicas para a produção de painéis aglomerados.

4.5 REGULARIZAÇÃO DA UMIDADE

Inicialmente, as partículas de *Pinus* spp. foram submetidas à secagem ao ar e utilizado estufa, com o objetivo de reduzir o excesso de umidade. Após essa etapa, o teor de umidade estabilizou-se em aproximadamente 5%, sendo necessária a secagem complementar em estufa até atingir cerca de 3%. As partículas de PET, por sua vez, apresentam baixo grau de higroscopicidade..

A determinação do teor de umidade das partículas até alcançar o valor planejado foi conduzida de acordo com a ABNT NBR 9939 (2012) – Agregado gráudo: Determinação do teor

de umidade total – Método de ensaio. Esse procedimento estabelece a pesagem inicial de três amostras (massa úmida), seguida da secagem em estufa. Em intervalos mínimos de duas horas, procede-se à nova pesagem das amostras até que se obtenha a massa seca estável.

Segundo a norma, a massa seca, também chamada de massa final, é alcançada quando a diferença entre duas pesagens consecutivas não ultrapassa 0,1% de perda de massa. O teor de umidade final foi obtido a partir da média dos valores calculados para cada amostra, sendo o mesmo determinado conforme a Equação (1).

$$U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

U = teor de umidade das partículas (%);

M_u = massa úmida das partículas (g);

M_s = massa seca das partículas (g).

4.6 DETERMINAÇÃO DA MASSA TOTAL DAS MISTURAS PARA PRODUÇÃO DOS PAINÉIS

Foram propostas duas misturas para a produção dos painéis, ambas compostas por partículas de madeira (*Pinus* spp.), PET e PUR, variando apenas a temperatura de prensagem: 80 °C e 100 °C.

O cálculo da massa total das misturas, considerando tanto a massa seca das partículas quanto a quantidade de adesivo, foi realizado utilizando-se a Equação 2.

$$M = D \times V \quad (2)$$

Onde:

M = massa total da mistura (g);

D = densidade nominal do painel (g/cm³);

V = volume do painel (cm³).

A massa base do painel foi definida em 980 g, valor obtido considerando as dimensões de 35 × 35 × 2 cm e aplicando a relação Equação 2.

Para o cálculo, adotou-se a densidade de 0,40 g/cm³ multiplicada pelo volume de 2.450 cm³, resultando em 980 g. Segundo Kelly (1977), a densidade da madeira é o parâmetro mais importante para determinar a potencialidade de uma espécie na fabricação de chapas de partículas. De modo geral, as espécies utilizadas na indústria de chapas aglomeradas apresentam densidade entre 0,40 e 0,60 g/cm³.

Considerou-se que o PUR corresponderia a 10% da massa total, resultando em 98 g, e o PET corresponderia a 25%, equivalente a 245 g. O restante foi atribuído ao *Pinus* spp., representando 65% da massa (637 g).

Para o cálculo em escala de produção, manteve-se a proporção de 100% *Pinus* spp. + 25% PET + 10% PUR, obtendo-se os seguintes valores: *Pinus* spp. = 2254 g, PET = 490 g e PUR = 392 g. Em determinadas condições de formulação, a soma de *Pinus* spp. e PET totalizou 1225 g, e o PUR foi calculado como 10% dessa massa, ou seja, 122,5 g. Esse valor, quando dividido igualmente entre dois painéis, resultou em 61,25 g de PUR por painel.

A utilização de 10% do adesivo PUR foi definida com base em estudos que indicam como economicamente viável a aplicação de teores entre 5% e 10% da massa seca de partículas (Iwakiri e Trianoski, 2020). Além disso, a escolha desse percentual se justifica por apresentar melhores propriedades físicas e mecânicas em comparação a teores menores (Cazella, 2022).

4.7 PRODUÇÃO DOS PAINÉIS

O processo para produção dos painéis foi iniciado com a adição do PET e do PUR às partículas de madeira, inicialmente esse material foi homogeneizado manualmente conforme ilustrado na Figura 13a e em seguida o material homogeneizado manualmente foi depositado num tambor giratório (betoneira) para finalização do processo de homogeneização dos materiais. Vale ressaltar que, devido ao PUR ser uma resina bicomponente, o processo de homogeneização ocorreu em duas etapas, inicialmente, após adição manual do polioliol realiza-se a homogeneização utilizando-se a betoneira durante cinco minutos (Figura 13b), em seguida, após adição manual do pré-polímero, realiza-se a homogeneização de todo o material durante cinco minutos utilizando-se a betoneira (Figura 13b).

Figura 13 - Processo de homogeneização dos materiais



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com as partículas previamente “encoladas”, foi preparado o colchão de partículas, realizando-se uma pré-prensagem a frio em formadora de colchão com dimensões de 35 × 35 cm. Em seguida, o colchão foi posicionado entre os pratos da prensa hidráulica com controle de temperatura e pressão (Figura 14).

Figura 14 - Colchão de partículas



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A prensagem foi realizada com pressão de 5 MPa e temperatura de 80°C e 100°C, valor definido entre os intervalos para acelerar a cura inicial do PUR e permitir que as partículas de PET atingissem a fase de transição vítrea, situada entre 69 e 115 °C, favorecendo a adesão entre partículas e o preenchimento de vazios internos (Ebewe, 2000; Awaja & Pavel, 2005).

O ciclo de prensagem consistiu em 10 minutos e 30 segundos, sendo 5 minutos iniciais de compactação, seguidos por um alívio de pressão de 30 segundos (Figura 15) e mais 5 minutos finais. Essa etapa intermediária de alívio tem como objetivo evitar a concentração de gases e a consequente formação de bolhas no interior dos painéis (Campos; Lahr, 2004).

Figura 15 - Realização do ciclo de prensagem



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os três painéis de cada mistura Figura 16, totalizando 6 unidades, foram acondicionados em local coberto e à temperatura ambiente por sete dias, a fim de completar o processo de cura do PUR.

Figura 16 - Realização dos três painéis de cada mistura



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após esse período, realizou-se o esquadreamento dos painéis e, em seguida, foram retirados 10 corpos de prova, com dimensões de 350×50 mm, destinados ao ensaio de flexão estática.

4.8 ENSAIOS FÍSICOS

Os ensaios de densidade (D), teor de umidade (U) e inchamento após 24 horas (I24h) foram conduzidos conforme os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR 14810-2 (2024).

4.8.1 Densidade (D)

Para a determinação da densidade, foram utilizados 10 corpos de prova para cada mistura, medindo-se suas dimensões e massa com o auxílio de micrômetro (precisão de 0,001 mm), paquímetro (precisão de 0,1 mm) e balança de precisão (0,01 g), respectivamente, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Medição da densidade dos painéis, utilizando paquímetro e micrômetro



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A partir das dimensões obtidas, calculou-se o volume de cada corpo de prova por meio da Equação 3.

$$V = b1 \times b2 \times e \quad (3)$$

Onde:

V = volume do cp (mm³);

b1 = dimensão de uma aresta do cp (mm);

b2 = dimensão de uma aresta do cp (mm);

e = espessura do cp (mm).

Com a massa aferida e o volume calculado, determinou-se a densidade dos corpos de prova, ilustrado na Figura 18, por meio da Equação 4.

Figura 18 - Aferição da massa dos corpos de prova para cálculo da densidade



Fonte: Elaboração do próprio autor.

$$D = \frac{M}{V} \times 1.000 \quad (4)$$

Onde:

D = densidade do cp (g/cm³);

M = massa do cp (g);

V = volume do cp (mm³).

A partir desses valores individuais, calculou-se a média aritmética para obter a densidade média dos painéis de cada mistura. Em seguida, aplicou-se a Equação 5 para determinar o coeficiente de variação percentual da densidade de cada corpo de prova em relação à densidade média de sua respectiva mistura.

$$D\% = \frac{D - D_{média}}{D_{média}} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

D% = variação percentual da densidade (%);

D = densidade do cp (g/cm³);

D_{média} = densidade média dos cps (g/cm³).

4.8.2 Teor de Umidade

Para a determinação do teor de umidade, foram utilizados 10 corpos de prova de cada mistura, com dimensões aproximadas de 50 × 50 mm. A massa úmida (massa inicial) foi medida em balança de precisão de 0,01 g.

Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 105 °C ± 2 °C e, após resfriamento, foi registrada a massa seca (massa final) de cada corpo de prova.

Com base nos valores de massa úmida e seca, o teor de umidade foi calculado utilizando a Equação 6.

$$U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

U = teor de umidade do cp (%);

M_u = massa úmida do cp (g);

M_s = massa seca do cp (g).

4.8.3 Inchamento em espessura 24h (I24h) e Absorção após 24h (A24h)

Para a determinação do inchamento em espessura após 24 horas, foram utilizados 10 corpos de prova para cada mistura, com espessuras iniciais aferidas (Figura 19). As amostras foram submersas em água deionizada, em recipiente de PVC, utilizando telas metálicas e pesos para mantê-las imersas sob uma lâmina de água de 25 mm (Figura 19).

Figura 19 - Realização do teste de inchamento da espessura após vinte e quatro horas



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após 24 horas, registrou-se novamente a espessura dos corpos de prova. Com os valores inicial (E_i) e final (E_f), o inchamento em espessura foi calculado pela Equação 7.

$$I = \frac{E_f - E_i}{E_i} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

I = inchamento em espessura do cp (%);

E_f = espessura (final) do cp após o período de imersão (mm);

E_i = espessura (inicial) do cp antes da imersão (mm).

Além disso, a massa dos corpos de prova foi aferida antes e após a imersão, possibilitando o cálculo da absorção de água após 24 horas, conforme a Equação 8.

$$A_{24h} = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

A_{24h} = absorção de água após 24h do cp (%);

M_u = massa úmida do cp (g);

M_s = massa seca do cp (g).

4.9 ENSAIO MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos para determinação do módulo de resistência à flexão estática (MOR), do módulo de elasticidade (MOE) e da resistência à tração perpendicular (TP) foram realizados na

máquina universal de ensaios EMIC GR048, com capacidade máxima de 300 kN, seguindo as orientações da ABNT NBR 14810-2 (2024).

4.9.1 Módulo de Resistência (MOR)

Para determinação do MOR realizou-se o ensaio de flexão estática, foram utilizados dez corpos de prova extraídos dos painéis de cada mistura, com dimensões de $350 \times 50 \times e$ mm, sendo e a espessura, variando entre 10 e 12 mm (Figura X). A distância entre apoios (vão) para o ensaio foi determinada por meio da Equação 9.

$$D = 20 \times E \quad (9)$$

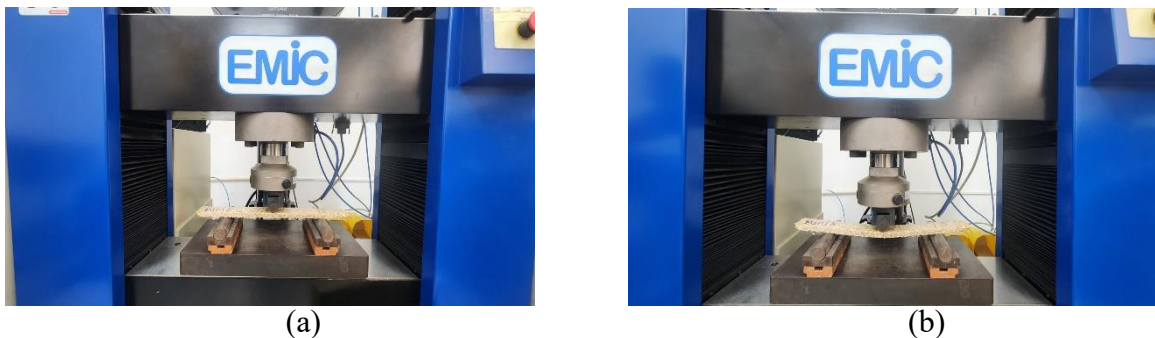
Onde:

D = distância entre apoios do aparelho (mm);

E = espessura média tomada em três pontos do cp (mm).

Após o cálculo do vão, os corpos de prova foram devidamente demarcados e submetidos ao ensaio, conforme ilustrado na sequência apresentada na Figura 20a e 20b.

Figura 20 - Ilustrações do ensaio de flexão estática



Fonte: Acervo do autor.

O módulo de resistência à flexão (MOR) dos corpos de prova foi determinado por meio da Equação (10), utilizando-se o valor da força de ruptura obtido diretamente no medidor de cargas da máquina de ensaio.

$$MOR = \frac{1,5 \times (P \times D)}{B \times (E)^2} \quad (10)$$

Onde:

MOR = módulo de resistência à flexão estática (MPa);

P = carga de ruptura lida no indicador de cargas (N);

D = distância entre apoios do aparelho (mm);

B = largura do cp (mm);

E = espessura média tomada em três pontos do cp (mm).

4.9.2 Módulo de Elasticidade (MOE)

O módulo de elasticidade (MOE) dos corpos de prova foi calculado utilizando a Equação (11), com base na carga no limite proporcional e na deflexão correspondente, ambas registradas pelo sistema de medição da máquina de ensaio.

$$MOE = \frac{P1 \times D^3}{d \times 4 \times B \times E^3} \quad (11)$$

Onde:

MOE = módulo de elasticidade (MPa);

P1 = carga no limite proporcional lida no indicador de cargas (N);

D = distância entre apoios do aparelho (mm);

d = deflexão, correspondente à carga P1 (mm);

B = largura do cp (mm);

E = espessura média tomada em três pontos do cp (mm).

4.9.3 Resistência à Tração Perpendicular (TP)

Para o ensaio de tração perpendicular (TP), foram utilizados 10 corpos de prova extraídos dos painéis de cada mistura, com dimensões aproximadas de 50 × 50 mm. Inicialmente, as superfícies dos corpos de prova foram regularizadas com uma lixadeira de fita, a fim de garantir melhor aderência na colagem aos suportes metálicos. Em seguida, suas dimensões foram aferidas com paquímetro de precisão 0,1 mm.

Os suportes metálicos também foram preparados, com lixamento e limpeza utilizando Thinner, visando otimizar a adesão do adesivo. A colagem foi realizada com adesivo epóxi Araldite Professional 90 minutos, conforme ilustrado na Figura 21.

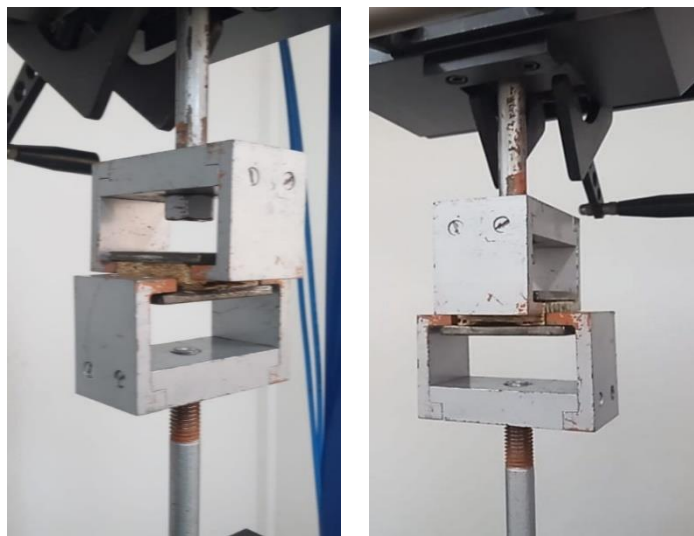
Figura 21 - Realização dos corpos de prova para realização do teste de resistência à tração perpendicular



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após a cura completa do adesivo, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração perpendicular na máquina universal de ensaios, como mostrado na Figura 22a e 22b. Com os dados obtidos, a resistência à tração perpendicular foi calculada por meio das Equações 12 e 13.

Figura 22 - Figura 22. Realização do teste de tração perpendicular



(a)

(b)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

$$TP = \frac{P}{S} \quad (12)$$

$$S = b1 \times b2 \quad (13)$$

Onde:

TP = resistência à tração perpendicular (MPa);

P = carga de ruptura (N);

S = área da superfície do cp (mm^2);

b_1 = dimensão do cp (mm);

b_2 = dimensão do cp (mm).

5 RESULTADO E DISCUSSÕES

Neste item serão apresentados os resultados obtidos com a realização dos ensaios para caracterização dos painéis.

5.1 APRESENTAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A curva granulométrica, construída a partir do retido acumulado em função da abertura das peneiras em escala logarítmica, permite identificar a fração dominante, o grau de concentração da distribuição e a continuidade granulométrica do sistema particulado. A leitura integrada das Tabelas 10, 11 e 12 evidencia que a introdução de *PEt* alterou de modo substancial a arquitetura granulométrica do conjunto, deslocando progressivamente a distribuição para aberturas menores.

Do ponto de vista metodológico, a interpretação aqui desenvolvida se alinha ao procedimento consagrado pela ABNT NBR NM 248:2003, norma adotada, com adaptações, em pesquisas recentes sobre partículas lignocelulósicas e misturas madeira-polímero. Trevisan (2021), Herradon (2023), Souza (2022), Cazella (2022), Oliveira (2019) e Bispo (2021) empregaram essa referência normativa para a determinação da composição granulométrica, ajustando massa de amostra, tempo de peneiramento e seleção prévia das partículas em razão da baixa densidade e da geometria irregular de madeira, PET, couro e fibra de coco. A massa ensaiada nesses resultados, próxima de 50 g, aproxima-se especialmente das adaptações registradas por Oliveira (2019) e Cazella (2022), ao mesmo tempo em que conserva o conjunto de peneiras recorrente nesses estudos.

5.1.1 Composição granulométrica do *Pinus* spp.

Na Tabela 10, o *Pinus* spp. apresentou distribuição fortemente concentrada nas peneiras nº 8 (2,38 mm) e nº 16 (1,19 mm), com 30,47% e 66,79% de retenção, respectivamente. Isso significa que 97,26% da massa ficou contida entre essas duas aberturas, sem retenção nas peneiras de 6,30 mm e 4,76 mm e com presença residual abaixo de 0,595 mm. A curva correspondente mostra um crescimento abrupto entre 2,38 e 1,19 mm, revelando uma distribuição estreita, com reduzida dispersão granulométrica.

Tabela 10 - Composição granulométrica do *Pinus* spp

Peneira N°	Abertura (mm)	Massa retida (g)	Retido (%)	Massa retida acumulada (g)	Retido acumulado (%)
¼"	6,3	0	0,00	0	0,00
4	4,76	0	0,00	0	0,00
8	2,38	15,23	30,47	15,23	30,47
16	1,19	33,39	66,79	48,62	97,26
30	0,595	1,2	2,40	49,82	99,66
50	0,297	0,17	0,34	49,99	100,00
100	0,149	0	0,00	49,99	100,00
Fundo	-	0	0,00	0	100,00
<i>Perdas (g): —</i>					
Módulo de finura (MF)					5,27

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Esse comportamento guarda proximidade com os resultados de Trevisan (2021), Herradon (2023) e Cazella (2022), que também observaram, para partículas de *Pinus* spp., predominância nas peneiras nº 8 e nº 16. A diferença, nesse caso, reside na concentração ainda mais intensa na peneira nº 16, o que sugere uma composição mais uniformemente centrada em partículas intermediárias. No universo comparado entre os três materiais, o módulo de finura apresentado na Tabela 10 (5,27) posiciona o *Pinus* spp. como o sistema relativamente menos refinado. Sob o ponto de vista tecnológico, esse arranjo tende a favorecer a regularidade do colchão particulado, embora, à luz de Trevisan (2021) e Oliveira (2019), deva ser posteriormente correlacionado aos ensaios mecânicos, uma vez que granulometrias mais finas e concentradas podem melhorar o ajuste interno, mas nem sempre maximizam o desempenho em flexão.

5.1.1.1 Composição granulométrica do PET

Na Tabela 11, o PET deslocou a distribuição para faixas menores, com 64,87% retido na peneira nº 16 (1,19 mm) e 31,35% na peneira nº 30 (0,595 mm), totalizando 98,24% até essa faixa.

A curva granulométrica concentra sua ascensão exatamente entre 1,19 e 0,595 mm, caracterizando um material de granulometria intermediária a fina. O módulo de finura apresentado (4,67) confirma a redução relativa do tamanho predominante em comparação com o *Pinus* spp.

Tabela 11 - Composição granulométrica do PET

Peneira Nº	Abertura (mm)	Massa retida (g)	Retido (%)	Massa retida acumulada (g)	Retido acumulado (%)
¼"	6,3	0	0,00	0	0,00
4	4,76	0	0,00	0	0,00
8	2,38	1,01	2,02	1,01	2,02
16	1,19	32,43	64,87	33,44	66,89
30	0,595	15,67	31,35	49,11	98,24
50	0,297	0,88	1,76	49,99	100,00
100	0,149	0	0,00	49,99	100,00
Fundo	-	0	0,00	0	100
<i>Perdas (g): —</i>					
Módulo de finura (MF)					4,67

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Esse resultado é altamente convergente com os achados de Cazella (2022) e Herradon (2023), cujas partículas de PET também ficaram retidas predominantemente nas peneiras de 1,19 mm e 0,595 mm. Em ambos os trabalhos, a redução do módulo de finura foi interpretada como indicativa de melhor capacidade de preenchimento de vazios e de maior interação entre partículas no interior do painel. Assim, o seu PET se enquadra no mesmo padrão descrito pela literatura, isto é, o de uma fração particulada mais fina, apta a modificar o empacotamento do sistema quando incorporada à madeira.

5.1.1.2 Composição granulométrica da mistura *Pinus* spp. + 25% PET

Na Tabela 12, a mistura com 75% de *Pinus* spp. e 25% de PET apresentou alteração expressiva da distribuição. A maior retenção passou para a peneira nº 30 (0,595 mm), com 62,00%,

seguida da peneira nº 16 (1,19 mm), com 24,68%, e da peneira nº 50 (0,297 mm), com 11,30%. Em consequência, a curva granulométrica deslocou o trecho de crescimento mais intenso para aberturas menores, fechando a distribuição em 0,297 mm. O módulo de finura informado na tabela (4,17) e o D50 aproximado de 0,92 mm reforçam que a incorporação de PET promoveu refino granulométrico marcado do sistema.

Tabela 12 - Composição granulométrica do *Pinus* spp. + 25% PET

Peneira Nº	Abertura (mm)	Massa retida (g)	Retido (%)	Massa retida acumulada (g)	Retido acumulado (%)
¼"	6,3	0	0,00	0	0,00
4	4,76	0	0,00	0	0,00
8	2,38	1,01	2,02	1,01	2,02
16	1,19	12,34	24,68	13,35	26,70
30	0,595	31	62,00	44,35	88,70
50	0,297	5,65	11,30	50	100,00
100	0,149	0	0,00	50	100,00
Fundo	-	0	0,00	0	100,00
<i>Perdas (g): —</i>					
Módulo de finura (MF)					4,17

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Esse comportamento merece destaque porque, nos estudos de Cazella (2022) e Herradon (2023), mesmo as misturas com 30% e 50% de PET permaneceram predominantemente concentradas nas peneiras nº 8 e nº 16, com participação mais moderada da peneira nº 30. Nos seus resultados, ao contrário, a peneira nº 30 tornou-se claramente dominante mesmo com apenas 25% de PET. Em termos analíticos, isso indica que a fração polimérica empregada exerceu influência mais intensa sobre a composição global, deslocando o sistema para uma condição mais fina e mais contínua do que a usualmente descrita para misturas *Pinus* spp./PET em dissertações recentes.

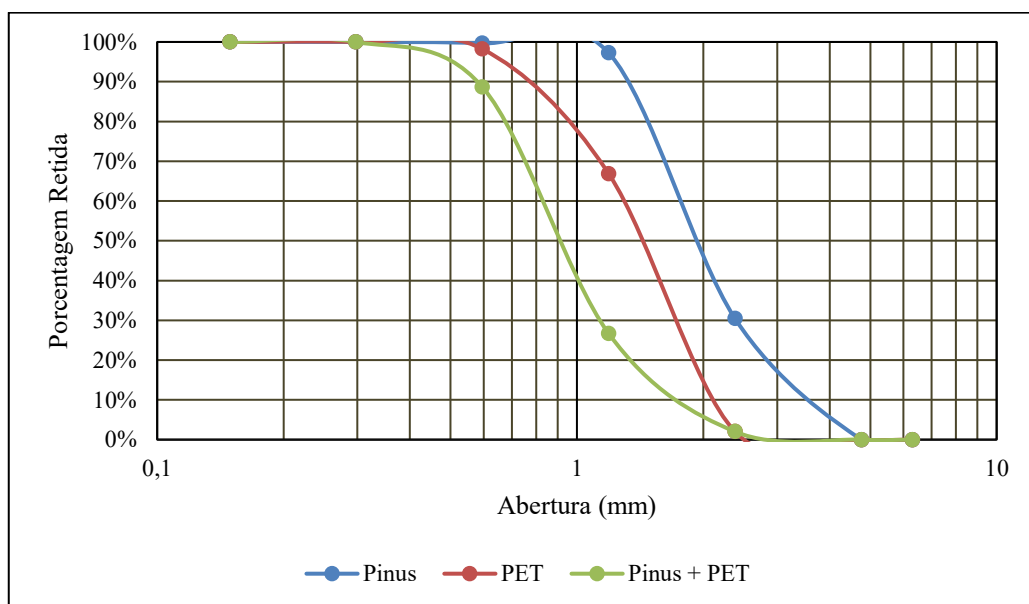
À luz de Cazella (2022) e Herradon (2023), tal refinamento tende a favorecer o preenchimento de vazios internos e a acomodação das partículas no colchão. Por outro lado,

conforme argumentam Trevisan (2021), Oliveira (2019) e Souza (2022), a interpretação granulométrica não deve ser isolada da resposta físico-mecânica: o aumento da fração fina amplia a superfície específica do material, pode demandar maior controle na distribuição do adesivo e pode alterar, em sentidos distintos, a flexão estática e a tração perpendicular.

5.1.1.3 Interpretação comparativa da curva granulométrica

Quando as três curvas são confrontadas, conforme a Figura 23, verifica-se que o *Pinus* spp. permanece concentrado em faixa intermediária, o PET ocupa condição intermediária a fina e a mistura *Pinus* spp. + 25% PET desloca-se nitidamente para aberturas menores. A inclinação mais abrupta da curva do *Pinus* spp. revela distribuição mais restrita; a do PET apresenta refinamento moderado; e a da mistura evidencia maior continuidade entre as frações de 1,19, 0,595 e 0,297 mm. Por interpolação linear em escala logarítmica, os valores aproximados de D50 foram 1,94 mm para o *Pinus* spp., 1,43 mm para o PET e 0,92 mm para a mistura, confirmando a redução progressiva do tamanho predominante das partículas.

Figura 23 - Curva granulométrica



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Esse resultado dialoga com Bispo (2021), para quem a composição granulométrica funciona como parâmetro de caracterização das misturas e como base para compreender diferenças posteriores de densidade e desempenho. Dialoga também com Souza (2022), que mostrou que a redistribuição granulométrica das partículas pode alterar a homogeneidade do painel e justificar

mudanças de configuração construtiva, como a adoção de camadas com frações mais finas nas faces. Portanto, a sua análise aponta que a adição de 25% de PET não atua apenas como substituição composicional, mas como agente de reorganização da estrutura particulada.

Em síntese, seus resultados indicam que o *Pinus* spp. constitui a fração estrutural mais intermediária do sistema, o PET representa a fração mais fina e a mistura *Pinus* spp. + 25% PET apresenta a distribuição granulométrica mais refinada e contínua entre os materiais avaliados. À luz da ABNT NBR NM 248:2003 e dos estudos de Trevisan (2021), Herradon (2023), Souza (2022), Cazella (2022), Oliveira (2019) e Bispo (2021), esse comportamento sugere potencial para melhor empacotamento interno e menor porosidade da mistura, hipótese que deverá ser confirmada pela correlação com densidade, absorção de água, inchamento em espessura, MOR, MOE e tração perpendicular, preferencialmente à luz da ABNT NBR 14810-2:2018.

5.2 DENSIDADE

A determinação da densidade aparente foi conduzida com base no Anexo G da ABNT NBR 14810-2, utilizando a razão entre massa e volume dos corpos de prova. Em seguida, calculou-se a densidade média de cada tratamento e a variação percentual da densidade em relação à média do lote, com registro do módulo máximo de variação, procedimento indispensável para a verificação da uniformidade do painel dentro do critério normativo.

Os resultados evidenciam aumento da densidade média com a elevação da temperatura de prensagem. Os painéis produzidos a 80 °C apresentaram densidade média de 0,9849 g/cm³, conforme observado na Tabela 13, enquanto os painéis obtidos a 100 °C alcançaram 1,0443 g/cm³, correspondendo a incremento absoluto de 0,0594 g/cm³ e relativo de 6,03%. Em ambas as condições, a dispersão foi moderada, com coeficientes de variação inferiores a 6%, porém o módulo máximo de variação da densidade ultrapassou o limite de $\pm 7\%$, atingindo 11,14% no tratamento de 80 °C e 8,46% no tratamento de 100 °C.

Tabela 13 -Estatística descritiva da densidade aparente por temperatura de prensagem

Temperatura	n	Média	DP	CV (%)	Mín.	Máx.	IC95%	Dmáx. (%)
80 °C	10	0,9849	0,0536	5,45	0,9376	1,0946	0,9465 a 1,0232	11,14
100 °C	10	1,0443	0,0494	4,73	0,9833	1,1327	1,0089 a 1,0796	8,46

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota: DP = desvio padrão; Dmáx. = módulo máximo de variação da densidade.

Sob a ótica do sistema ABNT NBR 14810, os valores médios obtidos situaram-se acima da faixa característica usualmente associada aos painéis de partículas de média densidade, o que afasta os materiais estudados do campo típico de MDP. Em termos tecnológicos, isso indica que a combinação entre composição do colchão, compactação e regime térmico produziu densificação superior à esperada para esse tipo de painel, aproximando o comportamento observado de materiais de maior massa específica.

No referencial ANSI A208.1, conforme observado na Tabela 14, a classificação inicial por densidade distingue painéis de baixa, média e alta densidade. Como todos os corpos de prova apresentaram valores superiores a $0,800 \text{ g/cm}^3$, os dois tratamentos podem ser posicionados na família de alta densidade. Entretanto, a atribuição de um grau específico da série H não pode ser feita apenas com base na densidade, pois a norma norte-americana também exige o atendimento a propriedades mecânicas, físicas e dimensionais complementares.

Tabela 14 - Verificação de pressupostos e comparação inferencial entre as temperaturas

Procedimento	Estatística	p / IC95%	Interpretação
Shapiro–Wilk (80 °C)	W = 0,845	p = 0,051	Normalidade não rejeitada ($\alpha = 0,05$)
Shapiro–Wilk (100 °C)	W = 0,908	p = 0,265	Normalidade não rejeitada ($\alpha = 0,05$)
Levene	F = 0,036	p = 0,851	Homogeneidade de variâncias não rejeitada
Teste t (amostras independentes)	t = -2,577	p = 0,019	Diferença significativa entre as médias
Diferença entre médias (100 – 80 °C)	0,0594	IC95% = 0,0110 a 0,1079	Aumento médio de 6,03%
Tamanho de efeito	g de Hedges = 1,10		Magnitude elevada
Mann–Whitney (confirmação)	U = 19	p = 0,021	Resultado convergente com o teste t

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para a comparação entre tratamentos, foram verificados os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias, conforme na Tabela 15. Os resultados permitiram o emprego do teste t de Student para amostras independentes, complementado pelo teste não paramétrico de Mann–Whitney. A diferença entre as médias foi estatisticamente significativa ($p = 0,019$), com intervalo de confiança de 95% entre 0,0110 e 0,1079 g/cm^3 . O tamanho de efeito, expresso por g de Hedges = 1,10, indica magnitude elevada, confirmando influência relevante da temperatura de prensagem sobre a densidade aparente.

Tabela 15 - Síntese da interpretação normativa segundo ABNT NBR 14810-2 e ANSI A208.1

Norma / referencial	Critério	Resultado	Síntese
ABNT NBR 14810-2:2018, Tabela 1 / Anexo G	Tolerância em relação à densidade média: $\pm 7\%$	80 °C: 11,14%; 100 °C: 8,46%	Não conforme em ambos os tratamentos
Sistema ABNT NBR 14810 (faixa característica de MDP na literatura técnica associada à norma)	551 a 750 kg/m ³ (0,551 a 0,750 g/cm ³)	80 °C: 984,9 kg/m ³ ; 100 °C: 1044,3 kg/m ³	Resultados acima da faixa típica de média densidade
ANSI A208.1 (classificação por densidade)	M: 640–800 kg/m ³ ; H: >800 kg/m ³	Todos os corpos de prova acima de 800 kg/m ³	Enquadramento na família de alta densidade

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Embora o tratamento a 100 °C tenha promovido maior densificação e ligeira redução da dispersão interna, ele não foi suficiente para enquadrar os painéis na tolerância de uniformidade prevista pela ABNT NBR 14810-2, conforme na Tabela 16. Os corpos de prova M1P233 e M1P223, no tratamento de 80 °C, e M2P544 e M2P533, no tratamento de 100 °C, foram responsáveis pelos desvios superiores a $\pm 7\%$, sugerindo heterogeneidade residual no processo de formação e consolidação do painel.

Tabela 16 - Corpos de prova que excederam o limite de $\pm 7\%$ de variação da densidade

Tratamento	Código	Densidade (g/cm³)	 D%
80 °C	M1P233	1,0946	11,14
80 °C	M1P223	1,0576	7,39
100 °C	M2P544	1,1327	8,46
100 °C	M2P533	1,1197	7,23

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O aumento da temperatura de prensagem de 80 °C para 100 °C elevou significativamente a densidade aparente dos painéis. Todavia, os dois tratamentos apresentaram densidades superiores à faixa característica de MDP no sistema ABNT NBR 14810 e não atenderam ao critério de uniformidade referente à variação máxima da densidade. No referencial ANSI A208.1, os painéis podem ser posicionados como produtos de alta densidade, mas o enquadramento definitivo em grau comercial específico permanece condicionado à realização dos ensaios complementares previstos em norma.

5.3 AVALIAÇÕES POR MEIO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS DAS PROPRIEDADES FÍCAS E MECÂNICAS DOS PAINÉIS

Na Tabela 17 são apresentados os valores médios ($\bar{x}$), os coeficientes de variação (CV), os resultados do teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância), os resultados do teste de Anderson–Darling (AD, 5% de significância), utilizado para avaliar a normalidade da distribuição dos resíduos da análise de variância (ANOVA, 5% de significância), e do teste de Comparações Múltiplas (CM, 5% de significância), empregado para avaliar a homogeneidade das variâncias.

Tabela 17 - Síntese dos resultados das propriedades físicas e mecânicas dos painéis

Propriedade	T (°C)	$\bar{x}$	CV (%)	Tukey (5%)	AD (5%)	CM (5%)
Inc-24h (%)	80	21.43	16.31	A	0.176	0.278
	100	17.61	12.97	B		
TU (%)	80	6.92	5.11	A	0.567	0.421
	100	5.36	4.87	B		
$\sigma_{\max}$ (MPa)	80	3.89	19.93	B	0.093	0.112
	100	7.16	22.02	A		
ε (MPa)	80	2.91	11.25	B	0.452	0.678
	100	3.63	13.23	A		
MOE (MPa)	80	1401	19.38	B	0.211	0.116
	100	1873	23.73	A		
MOR (MPa)	80	16.21	10.96	B	0.547	0.376
	100	23.76	12.61	A		

Fonte: Elaboração do próprio autor.

No teste de Tukey, a letra A denota o nível do fator associado ao maior valor médio da variável resposta investigada, B o segundo maior valor médio, e assim sucessivamente. Letras iguais indicam tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si.

De acordo com o teste de comparação de médias de Tukey, a temperatura de prensagem, nos níveis de 80 °C e 100 °C, exerceu influência significativa sobre todas as propriedades físicas e mecânicas avaliadas nos painéis produzidos. A elevação da temperatura resultou na redução do inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água, de 21,43% para 17,61%, e do teor de umidade, de 6,92% para 5,36%, ao mesmo tempo em que promoveu incrementos na tensão máxima, de 3,89 para 7,16 MPa, na deformação na ruptura, de 2,91% para 3,63%, no módulo de elasticidade, de 1401 para 1873 MPa, e no módulo de ruptura à flexão estática, de 16,21 para 23,76 MPa. Esse comportamento indica que a prensagem a 100 °C proporcionou condição mais favorável à consolidação do colchão de partículas e à cura do adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, favorecendo a formação de uma matriz polimérica mais contínua, coesa e eficiente na transferência de tensões. Resinas à base de óleo de mamona apresentam cinética de cura sensível à temperatura, sendo a faixa próxima de 90 a 100 °C apontada como adequada ao desenvolvimento mais completo da rede polimérica, com reflexos diretos na estabilidade dimensional e no desempenho mecânico dos painéis (DURAN *et al.*, 2025). Resultados análogos foram reportados por Silva *et al.* (2024), que verificaram redução do inchamento em espessura e melhora das propriedades mecânicas em painéis particulados submetidos a temperaturas de prensagem mais elevadas, em razão da maior uniformidade da fase polimérica e da menor suscetibilidade à penetração de água.

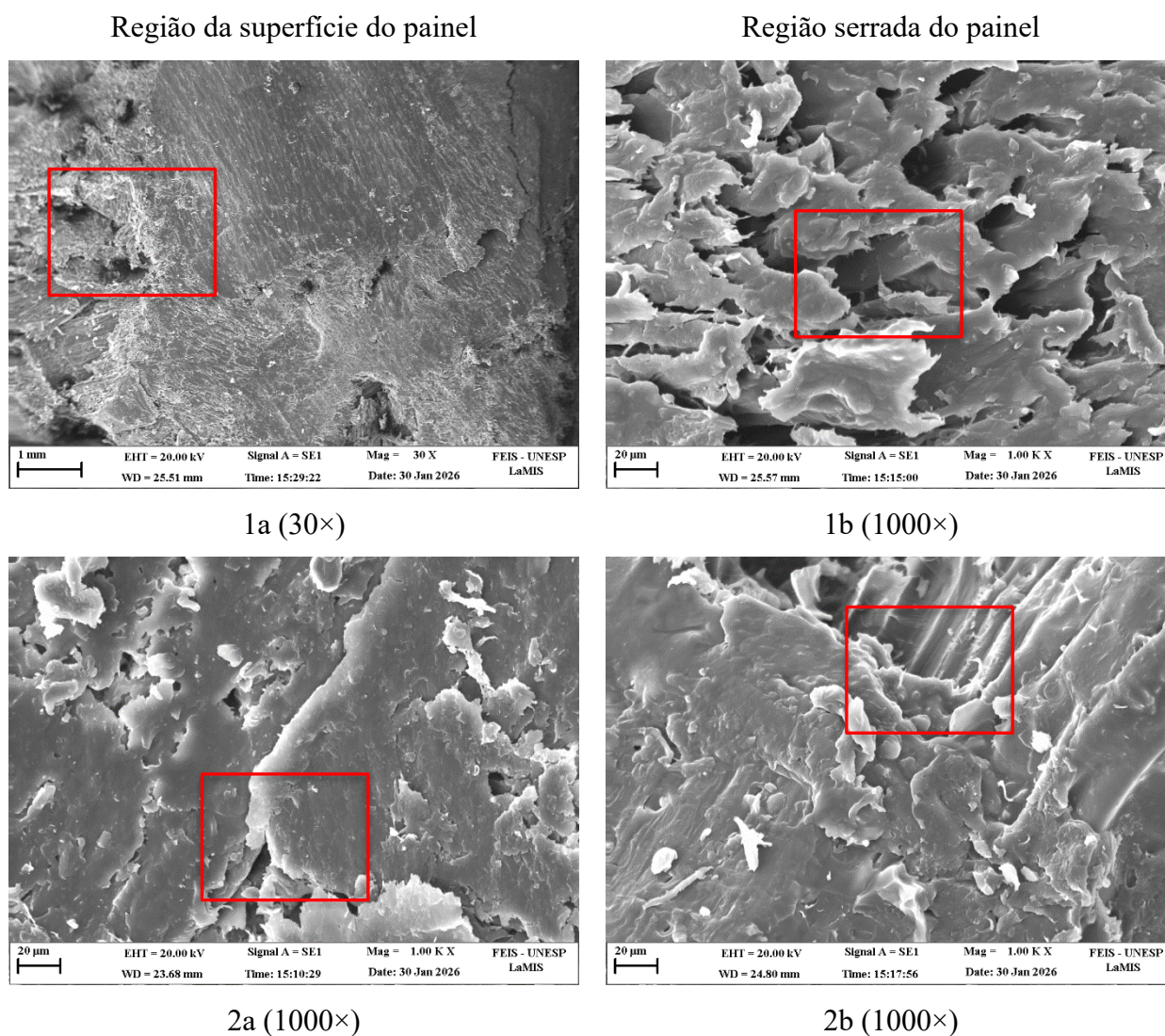
Sob essa perspectiva, a redução do Inc-24h pode ser atribuída à diminuição de vazios internos e de caminhos preferenciais para a difusão de água, decorrente da maior fluidez inicial do sistema e da posterior consolidação mais eficiente da matriz. A prensagem a 100 °C ocorre acima da faixa típica de transição vítrea do PET, reportada entre 75 °C e 79 °C, a depender da cristalinidade e do histórico térmico do material (WEI *et al.*, 2019), condição que aumenta a mobilidade do polímero termoplástico, favorece sua acomodação no interior do colchão e amplia a área de contato interfacial. Como consequência microestrutural desses efeitos combinados, observou-se elevação de σ_{max} , ϵ , MOE e MOR, indicando maior coesão interna e melhor adesão interfacial entre partículas lignocelulósicas, resina e PET.

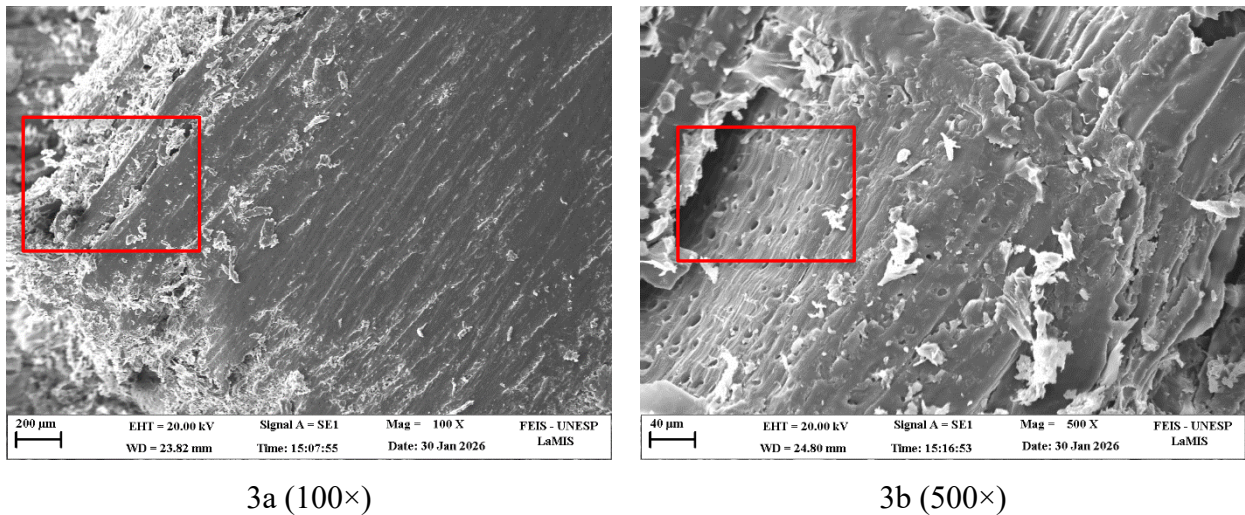
5.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV

Neste item, são apresentadas as micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas regiões superficiais dos painéis e nas regiões internas expostas após o seccionamento dos corpos de prova (CPs). Para a realização da MEV, os CPs foram cortados com arco de serra provido de lâmina de 2 mm de espessura e, posteriormente, reduzidos às dimensões

de 5×5 mm. Desse modo, as Figuras 24 e 25 reúnem imagens referentes à superfície dos painéis e às regiões serradas, com a indicação do nível de ampliação de cada micrografia.

Figura 24 - Imagens de MEV das regiões da superfície e da região serrada do painel da mistura M1, com ampliações de $30\times$ (1a), $1000\times$ (1b), $1000\times$ (2a), $1000\times$ (2b), $100\times$ (3a) e $500\times$ (3b)



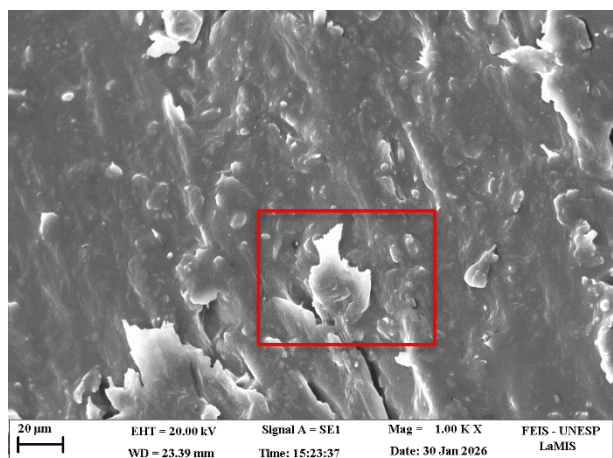


Fonte: Elaboração do próprio autor.

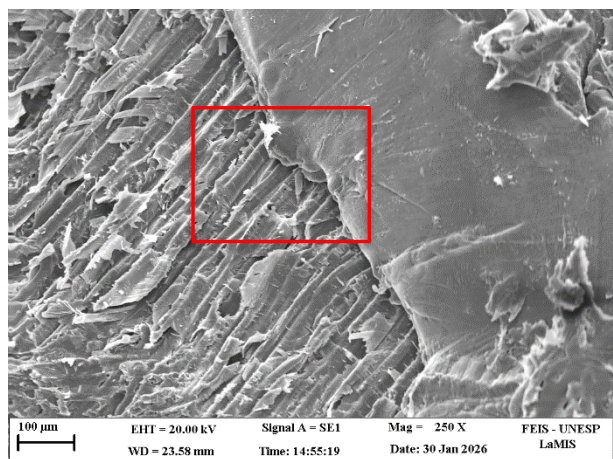
Na Figura 24, observam-se micrografias comparativas da superfície do painel e da região serrada, representativa do interior do corpo de prova extraído da mistura M1, produzida a 80 °C. Nas imagens 1a (30×), 2a (1000×) e 3a (100×), referentes à superfície, identificam-se descontinuidades e espaços vazios, indicando que, embora a temperatura empregada tenha alcançado a faixa de transição vítrea do PET, o recobrimento das partículas não ocorreu de forma homogênea. Essa morfologia favorece a penetração de água e contribui para os valores mais elevados de inchamento observados nos ensaios físicos. Nas imagens 1b (1000×), 2b (1000×) e 3b (500×), representativas da região serrada do painel, verificam-se partículas de madeira seccionadas e vazios interpartículas, além de elementos anatômicos da madeira de *Pinus spp.* parcialmente preenchidos, com maior evidência em 3b. Ainda assim, a interação entre PUR e PET mostrou-se suficiente para promover a aglutinação das partículas, o que ajuda a explicar o desempenho mecânico satisfatório dos painéis produzidos a 80 °C, apesar dos resultados de inchamento superiores aos valores esperados sob o ponto de vista normativo.

Figura 25 - Imagens de MEV das regiões da superfície e da região serrada do painel da mistura M2, com ampliações de 1000× (1a), 500× (1b), 250× (2a), 250× (2b), 250× (3a) e 1000× (3b)

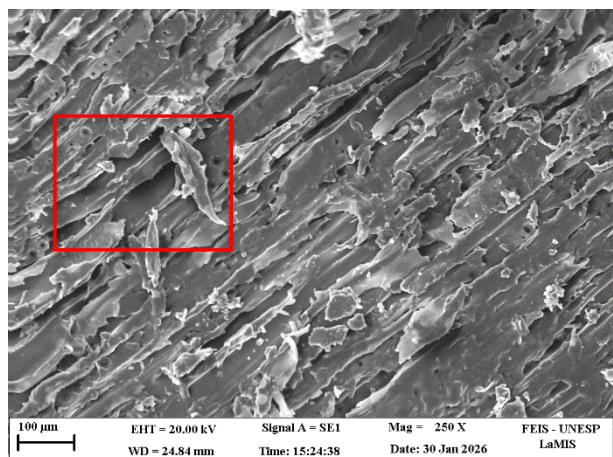
Região da superfície do painel



1a (1000×)

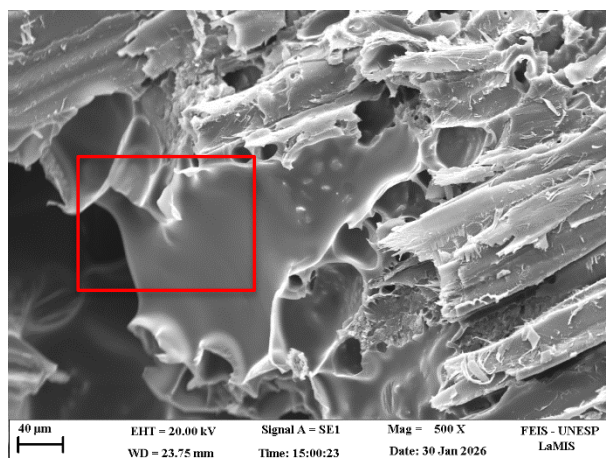


2a (250×)

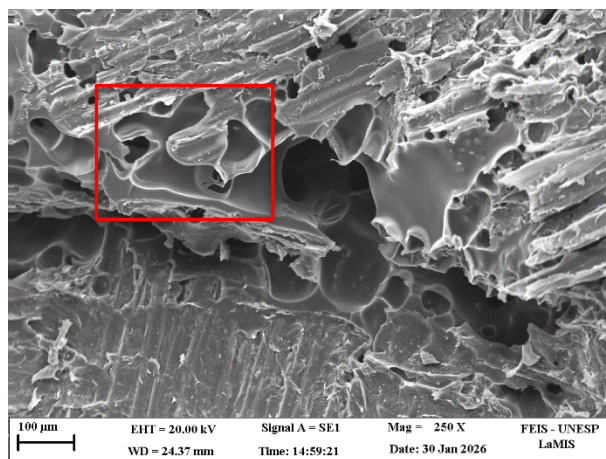


3a (250×)

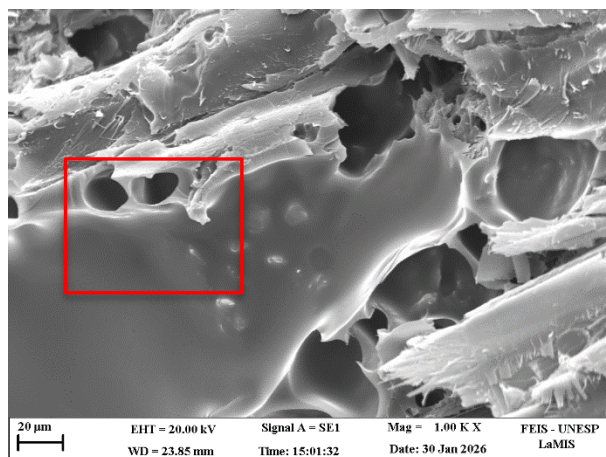
Região serrada do painel



1b (500×)



2b (250×)



3b (1000×)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 25, são apresentadas as micrografias dos painéis da mistura M2, produzidos a 100 °C, permitindo a comparação entre a superfície dos painéis e a região serrada, representativa do interior do material. As imagens 1a (1000×), 2a (250×) e 3a (250×) correspondem à superfície, ao passo que 1b (500×), 2b (250×) e 3b (1000×) retratam a região serrada.

De modo geral, a temperatura de 100 °C proporcionou melhor recobrimento das partículas de madeira pelo sistema PET/PUR, uma vez que o aquecimento se manteve acima da faixa de transição vítrea do PET. Em consequência, observa-se maior fluidez do polímero e preenchimento mais efetivo dos vazios, tanto na superfície quanto no interior dos painéis. Nas imagens 1b (500×), 2b (250×) e 3b (1000×), nota-se que os elementos anatômicos da madeira de *Pinus spp.* se encontram mais intensamente envelopados pela matriz polimérica, evidenciando uma interface mais contínua e homogênea. Tal condição é compatível com os melhores resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas dos painéis caracterizados.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que a temperatura de prensagem exerce influência decisiva sobre a consolidação microestrutural e sobre o desempenho físico-mecânico dos painéis produzidos com 65% de partículas de *Pinus spp.*, 25% de PET reciclado e 10% de poliuretano à base de óleo de mamona. A elevação da temperatura de 80 °C para 100 °C promoveu uma reorganização mais eficiente da estrutura particulada, com reflexos diretos na estabilidade dimensional, na rigidez e na resistência do compósito.

Na comparação entre tratamentos, a condição de 100 °C reduziu o inchamento em espessura após 24 h de 21,43% para 17,61% e o teor de umidade de 6,92% para 5,36%, elevando a tensão máxima de 3,89 para 7,16 MPa, a deformação na ruptura de 2,91 para 3,63, o módulo de elasticidade de 1401 para 1873 MPa e o módulo de ruptura de 16,21 para 23,76 MPa. As diferenças estatísticas confirmam que o maior tratamento térmico favoreceu a cura do sistema PUR/PET e a transferência de tensões no interior do painel.

A análise microestrutural por MEV confirma essa interpretação, pois os painéis prensados a 100 °C exibiram maior recobrimento das partículas lignocelulósicas, melhor preenchimento dos vazios e interface mais contínua entre madeira, PET e poliuretano, condição compatível com a menor susceptibilidade à água e com o ganho mecânico observado.

Do ponto de vista normativo, considerando os critérios adotados neste estudo à luz da ABNT NBR 14810-2:2024 para painéis com espessura superior a 13 mm e até 20 mm, o tratamento a 80 °C não alcançou o enquadramento mínimo na classe P2, pois apresentou MOE de 1401 MPa, inferior ao limite de 1600 MPa. Já o painel produzido a 100 °C atingiu, nas propriedades diretamente comparáveis ao tipo de uso, os patamares compatíveis com o painel P2, isto é, painel não estrutural para uso interno em condições secas, sem alcançar classes superiores.

Cumprе ressaltar, entretanto, que a conformidade normativa integral ainda não pode ser afirmada, uma vez que ambos os tratamentos ultrapassaram o limite de variação máxima da densidade em relação à média do lote. Assim, o tratamento a 100 °C permite determinar o painel como P2 sob a ótica do desempenho funcional, mas evidencia a necessidade de maior controle da homogeneidade do processo produtivo para o pleno atendimento normativo.

Em perspectiva aplicada, a incorporação de PET reciclado associada ao adesivo poliuretano de origem renovável mostrou-se tecnicamente viável para a produção de painéis destinados a aplicações não estruturais na construção civil e na indústria moveleira.

A prensagem a 100 °C constitui a condição tecnicamente mais consistente entre as investigadas, por reunir menor instabilidade higroscópica, melhor desempenho mecânico e

enquadramento funcional como painel tipo P2. Tal resultado converge com as investigações desenvolvidas no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da FEIS, que têm priorizado estratégias voltadas à elevação da qualidade tecnológica dos painéis aglomerados e à mitigação de sua vulnerabilidade higroscópica.

REFERÊNCIAS

- ABREU, L. B. de; MENDES, L. M.; IWAKIRI, S. Aproveitamento de resíduos de painéis de madeira produzidos com e sem lâminas de bambu. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 129-134, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/j4NJD5NjzVPGnZ9FgYDLSJK/?format=pdf>. Acesso em: 20 mar. 2025.
- AGUIAR, A.V. de. **Cultivo de pinus**. 2. ed. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1155568>. Acesso em: 2 abr. 2025.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A208.1-2022**: particleboard. Leesburg: Composite Panel Association, 2022.
- ASLANOĞLU, R. *et al.* Ten questions concerning the role of urban greenery in shaping the future of urban areas. **Building and Environment**, Amsterdam, v. 267, Part A, 2025, 112154. DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.112154.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. **13º censo da reciclagem de PET no Brasil**. [S. l.]: ABIPET, 2025. Disponível em: <https://abipet.org.br/wp-content/uploads/2025/05/Abipet-Factsheet-13o-Censo-final.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9939**: agregado gráudo: determinação do teor de umidade total: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14810-2**: painéis de partículas de média densidade: parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- AUTENGRUBER, M.; LUKACEVIC, M.; WENIGHOFER, G.; MAURITZ, R.; FÜSSL, J. Finite-element-based concept to predict stiffness, strength, and failure of wood composite I-joist beams under various loads and climatic conditions. **Engineering Structures**, Oxford, v. 245, 112908, 2021. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112908.
- BAŞBOĞA, İ. H. *et al.* Utilization of different size waste melamine impregnated paper as an adhesive in the manufacturing of particleboard. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, London, v. 120, art. 103275, 2023. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2022.103275.
- BATTEGAZZORE, D.; ALONGI, J.; FRACHE, A.; WÄGBERG, L.; CAROSIO, F. Layer by Layer-functionalized rice husk particles: a novel and sustainable solution for particleboard production. **Materials Today Communications**, Oxford, v. 13, p. 92-101, 2017. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2017.09.006.
- BENEDICTO, S. C. de *et al.* Postura metodológica indutiva e dedutiva na produção científica dos estudos em administração e organizações: uma análise de suas limitações e possibilidades. **Economia & Gestão**, Belo Horizonte, v. 12, n. 30, p. 4-19, set./dez. 2012. Disponível em: <http://periodicos.pucminas.br/index.php/economiaegestao/article/view/P.1984-6606.2012v12n30p4>. Acesso em: 18 set. 2025.

BISPO, R. A. **Produção e avaliação de painéis de partículas de fibra de coco, pinus e eucalipto aglutinadas com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona**. 2021. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/214450>. Acesso em: 20 nov. 2025.

BOLLAKEYALA, V. L. *et al.* Enhancement of sustainable wood-plastic composite properties in presence of bio-based additive. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.08.024.

BOLLAKEYALA, V. L. *et al.* Enhancement of wood-plastic composite properties in presence of recycled vehicular soot as a carbon source material: Sustainable management approach. **Process Safety and Environmental Protection**, London, v. 174, p. 286-297, 2023. DOI: 10.1016/j.psep.2023.04.013.

BOLLAKEYALA, V. L.; ETAKULA, N.; VUBA, K. K.; MANNE, Y. S.; UTTARAVALLI, A. N. Preparation and characterization of green composites based on expanded polystyrene waste and biomass: sustainable management approach. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, v. 66, p. 1762-1768, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.05.275.

CAZELLA, P. H. da S. **Avaliação de painéis aglomerados homogêneos de pinus com incorporação de partículas de PET aglutinados com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/37b1cb19-c9e5-4c6a-956e-b1643ac68b5d>. Acesso em: 18 dez. 2025.

CAZELLA, P. H. da S.; SOUZA, M. V.de; RODRIGUES, F. R.; SILVA, S. A. M. da; BISPO, R. A.; ARAUJO, V. A.de; CHRISTOFORO, A. L. Polyethylene terephthalate (PET) as a recycled raw material for particleboards produced from pinus wood and biopolymer resin. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 447, art. 141460, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141460.

CEBALLOS, G. *et al.* Accelerated modern human-induced species losses: entering the sixth mass extinction. **Science Advances**, Washington, v. 1, n. 5, e1400253, 2015.

CEBALLOS, G. *et al.* Vertebrates on the brink as indicators of biological annihilation and the sixth mass extinction. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 117, n. 24, p. 13596-13602, 2020.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. da. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, 8., 2011, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: CBGDP, 2011.

COSTA, L. L. *et al.* Painel particulado de baixa densidade produzido com resíduos de sisal. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/QR4cnbGgyKnp6Zgx4bvRrsK/?lang=pt>. Acesso em: 16 abr. 2025.

DUARTE, B. B. **Influência de componentes químicos em propriedades mecânicas da madeira**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde-15092017-083621/publico/BarbaraBranquinhoDuarteDOcorrigida.pdf>. Acesso em: 7 maio 2025.

DURAN, A. J. F. P. *et al.* Evaluation of physical and mechanical properties in medium density particleboards made from sugarcane bagasse and plastic waste (HDPE) at different pressing temperatures. **Industrial Crops & Products**, Amsterdam, v. 223, art. 120190, 2025. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.120190.

DURAN, Afonso José Felício Peres et al. The use of castor oil resin on particleboards: a systematic performance review and life cycle assessment. **Sustainability**, Basel, v. 17, n. 8, p. 3609, 2025. DOI: 10.3390/su17083609.

FERENHOF, H. A.; FERNANDES, R. F.. Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: método SSF. **Revista ACB**, Florianópolis, v. 21, n. 3, p. 550-563, 2016. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6868195.pdf>. Acesso em: 2 out. 2025.

FOOTPRINT DATA FOUNDATION; YORK UNIVERSITY. **National Ecological Footprint and Biocapacity Accounts**: 2025 edition release notes. [S. l.], 2025. Disponível em: https://footprint.info.yorku.ca/files/2025/04/2025_NEFBA_ReleaseNotes.pdf. Acesso em: 8 jan. 2025.

FUNDO MONETÁRIO INTERNACIONAL. **Brazil and the IMF**. Washington, DC, 2025. Disponível em: <https://www.imf.org/en/countries/bra>. Acesso em: 4 fev. 2025.

GILIO, C. G. **Compósito lignocelulósico com resina poliuretana derivada de óleo de mamona e resíduos da indústria moveleira**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2020. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/11449/192279/3/gilio_cg_me_ilha.pdf. Acesso em: 19 ago. 2025.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. **Ecological footprint**. Oakland, 2025. Disponível em: <https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

GONÇALVES, F. G.; PAES, J. B.; LOPEZ, Y. M.; SEGUNDINHO, P. G. de Alcântara; OLIVEIRA, R. G. E. de; FASSARELLA, M. V.; BRITO, A. S.; CHAVES, I. L. S.; MARTINS, R. S. F.. Resistance of particleboards produced with ligno-cellulosic agro-industrial wastes to fungi and termites. **International Biodeterioration & Biodegradation**, [S. l.], v. 157, art. 105159, 2021. DOI: 10.1016/j.ibiod.2020.105159.

HEINRICH BÖLL STIFTUNG; BREAK FREE FROM PLASTIC. **Atlas do plástico 2020**: fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos. Rio de Janeiro: Fundação Heinrich Böll, 2020. Disponível em: <https://br.boell.org/sites/default/files/2020-11/Atlas%20do%20PI%C3%A1stico%20-%20vers%C3%A3o%20digital%20-%2030%20de%20novembro%20de%202020.pdf>. Acesso em: 4 set. 2025.

HEJNA, A. *et al.* Upcycling of medium-density fiberboard and polyurethane foam wastes into novel composite materials. **Resources, Conservation & Recycling Advances**, [S. l.], v. 25, art. 200244, 2025. DOI: 10.1016/j.rcradv.2025.200244.

HERRADON, M. P. **Resíduos de movelaria com polietileno tereftalato para produção de painéis aglomerados aglutinados com poliuretano derivado de mamona**. 2023. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/5e598987-e748-41da-ad72-080976ecc0d7>. Acesso em: 25 jul. 2025.

HOLZER, D.; POPOWICZ, M.; RAUTER, R.; SILBERSCHNEIDER, K.; STERN, T. Parallel universes, one circular goal: An empirical study comparing Austrian wood- and plastic-based industries. **Sustainable Production and Consumption**, London, v. 43, p. 46-61, 2023. DOI: 10.1016/j.spc.2023.10.014.

HOSSEINI, S. B.; GAFF, M.; SMARDZEWSKI, J. Plastic deformation assessment of sawdust-rPET composites under bending load. **Composites Part C: Open Access**, Oxford, v. 15, art. 100538, 2024. DOI: 10.1016/j.jcomc.2024.100538.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2023**. São Paulo: Ibá, 2023. Disponível em: <https://twosides.org.br/wp-content/uploads/sites/15/2023/02/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2025.

ISWANTO, A.H. *et al.* Thermo-mechanical, physico-chemical, morphological, and fire characteristics of eco-friendly particleboard manufactured with phosphorylated lignin addition. **Journal of Renewable Materials**, Henderson, v. 12, n. 7, p. 1311-1341, 2024. DOI: 10.32604/jrm.2024.052172.

JIANG, J.; LU, X. Effect of blocked polyurethane prepolymer on properties of MUF-particleboard made from high moisture particles. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, London, v. 78, p. 189-194, 2017. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2017.07.002.

KHAN, A. *et al.* Towards sustainable wood-plastic composites: polymer types, fillers, processing strategies, performance enhancement and applications. **Sustainable Energy & Fuels**, Cambridge, v. 3, p. 2833-2862, 2025. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/su/d5su00153f>. Acesso em: 17 jul. 2025.

KLÍMEK, P. *et al.* Utilization of air-plasma treated waste polyethylene terephthalate particles as a raw material for particleboard production. **Composites Part B**, Oxford, v. 90, p. 188-194, 2016. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.12.019.

KRAMÁR, S. *et al.* Use of basalt scrim to enhance mechanical properties of particleboards. **Construction and Building Materials**, London, v. 238, art. 117769, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117769.

LEITE, J. H. V. **Viabilidade técnica de produção de compósito de resíduos lignocelulósicos para painéis**. Itapeva: Universidade Estadual Paulista, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstreams/ad0845f5-089d-49c8-8b46-eb985074cc6b/download>. Acesso em: 21 maio 2025.

LI, Y.; DAI, Z.; HU, C.; TU, D.; YUN, H. Optimisation of particle distribution and performance in three-layer tubular particleboards using response surface methodology. **Journal of Building Engineering**, Oxford, v. 82, art. 108256, 2024. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.108256.

LOPEZ, Y. M.; GONÇALVES, F. G.; PAES, J. B.; GUSTAVE, D.; NANTET, A. Clara T.; SALES, T. J. Resistance of wood plastic composite produced by compression to termites *Nasutitermes corniger* (Motsch.) and *Cryptotermes brevis* (Walker). **International Biodeterioration & Biodegradation**, [S. l.], v. 152, art. 104998, 2020. DOI: 10.1016/j.ibiod.2020.104998.

LOPEZ, Y. M.; GONÇALVES, F. G.; PAES, J. B.; GUSTAVE, D.; SEGUNDINHO, P. G. de A.; LATORRACA, J. V. de F.; NANTET, A. C. T.; SUUCHI, M. A. Relationship between

internal bond properties and X-ray densitometry of wood plastic composite. **Composites Part B**, Oxford, v. 204, art. 108477, 2021. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108477.

LOPEZ, Y. M.; PAES, J. B.; GUSTAVE, D.; GONÇALVES, F. G.; MENDEZ, F. C.; NANTET, A. C. T. Production of wood-plastic composites using *Cedrela odorata* sawdust waste and recycled thermoplastics mixture from post-consumer products: a sustainable approach for cleaner production in Cuba. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 244, art. 118723, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118723.

ŁUKAWSKI, Damian; HOCHMANSKA-KANIEWSKA, Patrycja; BAŁĘCZNY, Wojciech; MARTIN, Anna; JANISZEWSKA-LATTERINI, Dominika; LEKAWA-RAUS, Agnieszka. Phenol-formaldehyde resin enriched with graphene nanoplatelets as an electroconductive adhesive for wood composites. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, London, v. 132, art. 103678, 2024. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2024.103678.

LYUTYY, P.; BEKHTA, P.; ORTYNSKA, G. Lightweight Flat Pressed Wood Plastic Composites: Possibility of Manufacture and Properties. **Drvna Industrija**, [S. l.], v. 69, n. 1, p. 55-62, 2018. DOI: 10.5552/drind.2018.1746.

MÁCHOVÁ, Eliška *et al.* Effect of moisture content on the load carrying capacity and stiffness of corner wood-based and plastic joints. **BioResources**, Zagreb, v. 14, n. 4, p. 8640-8655, 2019.

MISHRA, V. R. Utilization of waste saw dust in development of epoxy resin hybrid green composite. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, v. 25, p. 799-803, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.030.

MOHD YUNUS, N. Y.; MOHAMMAD, N. A. Tensile performances of radiation triggered wood-plastic composite and trimethylolpropane triacrylate (TMPTA) as additive at different treatments. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, v. 51, p. 1293-1297, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.10.330.

NEČASOVÁ, B. *et al.* Effect of adhesive joint stiffness on optimal size of large-format cladding comparison of artificial and real environment. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, London, v. 98, art. 102489, 2020. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2019.102489.

NĚMEC, M. *et al.* Development of an innovative powder adhesive based on epoxy-polyester and lignin for production of particleboards. **Case Studies in Construction Materials**, Amsterdam, v. 23, art. e04985, 2025. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04985.

NOGUEIRA, N. D.; NARCISO, C. R. P.; FELIX, A. de L.; MENDES, R. F. Pressing temperature effect on the properties of medium density particleboard made with sugarcane bagasse and plastic bags. **Materials Research**, São Carlos, v. 25, e20210491, 2022. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2021-0491.

OLIVEIRA, R. C. de. **Produção e avaliação de painéis de partículas de eucalipto e couro com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona**. 2019. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/190690>. Acesso em: 6 nov. 2025.

PAGE, M. J. *et al.* A declaração PRISMA 2020: diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. **Revista Panamericana de Salud Pública**, Washington, DC, v. 46, e112, 2022. Disponível em: <https://www.scielosp.org/article/rpsp/2022.v46/e112/>. Acesso em: 16 out. 2025.

RAMACHANDRAREDDY, B.; HERWIJNEN, H. W. G. van; BECK, G.; BREDESEN, R.; KONNERTH, J. Mechanical properties of wood adhesive bond lines tested in service classes according to Eurocode 5. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, London, v. 118, 103233, 2022. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2022.103233.

RITCHIE, H.; ROSADO, P.; ROSER, M. **The world has lost one-third of its forests, but an end to deforestation is possible**. Our World in Data, 2021.

RODFI, M. I.; TAMAT, N. S. M.; NURYAWAN, A.; SAKAGAMI, H.; HERMAWAN, A. Studies on particleboard production using Expanded Polystyrene (EPS) waste as a binder for construction applications. **Construction and Building Materials**, London, v. 449, art. 138279, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138279.

RODRIGUES, Felipe R.; BISPO, Rodrigo A.; CAZELL, Pedro Henrique; SILVA, Michael Jones; CHRISTOFORO, André L.; SILVA, Sergio A. M. Particleboard Composite Made from Pinus and Eucalyptus Residues and Polystyrene Waste Partially Replacing the Castor Oil-Based Polyurethane as Binder. **Materials Research**, Sao Carlos, v. 26, supl. 1, e20220594, 2023. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2022-0594.

SANTAROSA, E.; PENTEADO JÚNIOR, J. F.; GOULART, I. C. G. **Cultivo do eucalipto**. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1155567/1/EmbrapaCultivoDoEucalipto2014.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2025.

SANTOS, R. S.; BARBOSA, J. J. **Template para produção de trabalhos acadêmicos na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Unesp**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Biblioteca, 2021. 41 p. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/#!/biblioteca/>. Acesso em: 01 jun. 2021.

SARAŽIN, J.; PIZZI, A.; AMIROU, S.; SCHMIEDL, Detlef; ŠERNEK, Milan. Organosolv Lignin for Non-Isocyanate Based Polyurethanes (NIPU) as Wood Adhesive. **Journal of Renewable Materials**, Henderson, v. 9, n. 5, p. 881-907, 2021. DOI: 10.32604/jrm.2021.015047.

SCHIRP, A.; SU, S. Effectiveness of pre-treated wood particles and halogen-free flame retardants used in wood-plastic composites. **Polymer Degradation and Stability**, London, v. 126, p. 81-92, 2016. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.01.016.

SILVA, Luana Cristal Lirya et al. Influence of pressing temperatures on physical–mechanical properties of wood particleboards made with urea-formaldehyde adhesive containing Al₂O₃ and CuO nanoparticles. **Polymers**, Basel, v. 16, p. 1652, 2024. DOI: 10.3390/polym16121652.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. **Exportação de produtos florestais 2022-2025**. Brasília, DF, 2026. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/paineis-interativos/exportacao-de-produtos-florestais-2022-2025>. Acesso em: 18 fev. 2025.

SOMMERHUBER, P. F.; WANG, T.; KRAUSE, A. Wood-plastic composites as potential applications of recycled plastics of electronic waste and recycled particleboard. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 121, p. 176-185, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.02.036.

SOMMERHUBER, P. F.; WELLING, J.; KRAUSE, A. Substitution potentials of recycled HDPE and wood particles from post-consumer packaging waste in Wood-Plastic Composites. **Waste Management**, Oxford, v. 46, p. 76-85, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.09.011.

SOMMERHUBER, P. F.; WENKER, J. L.; RÜTER, S.; KRAUSE, A. Life cycle assessment of wood-plastic composites: Analysing alternative materials and identifying an environmental sound end-of-life option. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 117, p. 235-248, 2017. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.10.012.

SOUZA, M. V. *et al.* Painéis aglomerados com resíduo de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/TMMT8gK3QjKGpzDq5rfTsky/>. Acesso em: 18 jun. 2025.

SOUZA, M. V. de. **Avaliação e viabilidade técnica para aproveitamento de resíduo de serraria de quatro espécies de madeira para produção de painéis aglomerados homogêneos e heterogêneos**. 2022. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/217998>. Acesso em: 10 maio 2025.

SRIVABUT, C.; RATANAWILAI, T.; HIZIROGLU, S. Effect of nanoclay, talcum, and calcium carbonate as filler on properties of composites manufactured from recycled polypropylene and rubberwood fiber. **Construction and Building Materials**, London, v. 162, p. 450-458, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.048.

SUN, Y. *et al.* The use of wood veneer to beautify wood plastic composites. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, London, v. 132, art. 103659, 2024. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2024.103659.

SUN, Y.; GUO, L.; LIU, Y.; WANG, W.; SONG, Y. Glue wood veneer to wood-fiber-high-density-polyethylene composite. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, London, v. 95, 102444, 2019. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2019.102444.

TASCIOGLU, C.; UMEMURA, K.; YOSHIMURA, T. Seventh-year durability evaluation of zinc borate incorporated wood-plastic composites and particleboard. **Composites Part B**, Oxford, v. 137, p. 123-128, 2018. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.11.011.

TORABI, E.; GHOULI, S.; MARŞAVINA, L.; AYATOLLAHI, M. R. Mixed mode fracture behavior of short-particle engineered wood. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, Amsterdam, v. 115, art. 103054, 2021. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103054.

TREVISAN, M. F. **Painéis aglomerados homogêneos produzidos com partículas de pinus e seringueira e aglutinados com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona: avaliação das propriedades físicas e mecânicas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/215188>. Acesso em: 4 dez. 2025.

WAHANE, A.; SAHU, A.; VERMA, A.; DEWANGAN, T. Evaluation of the physical and mechanical properties of composite board by utilizing agricultural waste. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, v. 84, p. 16-23, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.142.

WANG, B.; WANG, X.; LIU, Yi; ZHANG, Q.; YANG, G.; ZHANG, D.; GUO, H. Phytic acid-Fe chelate cold-pressed self-forming high-strength polyurethane/marigold straw composite with flame retardance and smoke suppression. **Polymer Degradation and Stability**, London, v. 208, art. 110269, 2023. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110269.

WEI, Ren et al. Biocatalytic degradation efficiency of postconsumer polyethylene terephthalate packaging determined by their polymer microstructures. **Advanced Science**, Weinheim, v. 6, p. 1900491, 2019. DOI: 10.1002/advs.201900491.

WONG, Y. J. *et al.* Development of surrogate predictive models for the nonlinear elasto-plastic response of medium density fibreboard-based sandwich structures. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, Beijing, v. 4, p. 302-314, 2021. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2021.02.002.

XU, H. *et al.* Mechanical properties variation in wood-plastic composites with a mixed wood fiber size. **Materials**, Basel, v. 16, n. 17, 5801, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/17/5801>. Acesso em: 5 ago. 2025.

YANG, A.; LIAO, Z.; XU, Z.; LIU, T.; FANG, Y.; WANG, W.; XU, M.; SONG, Y.; WANG, Q.; LI, Y. Scalable production of robust and creep resistant ultra-high filled wood-plastic composites. **Composites Part B**, Oxford, v. 289, art. 111937, 2025. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111937.

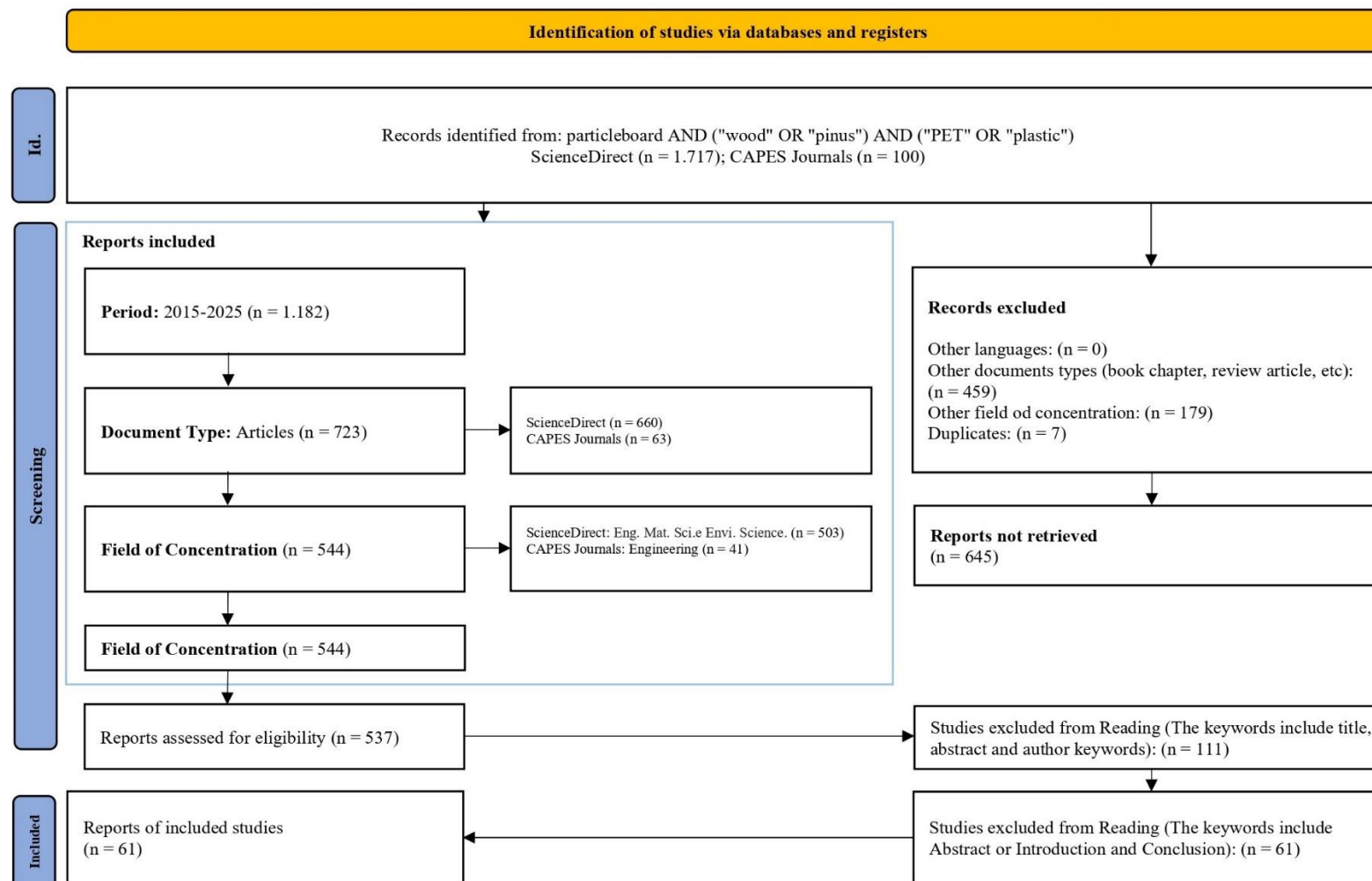
YANG, F.; ZENG, J.; LONG, H.; XIAO, J.; LUO, Y.; GU, J.; ZHOU, W.; WEI, Y.; DONG, X. Micrometer Copper-Zinc Alloy Particles-Reinforced Wood Plastic Composites with High Gloss and Antibacterial Properties for 3D Printing. **Polymers**, Basel, v. 12, art. 621, 2020. DOI: 10.3390/polym12030621.

YANG, S.; LI, M.; WANG, Y.; LIU, X.; QING, Y.; LI, X.; WU, Y.; LIU, M.; ZHANG, X. Industrial-scale manufacturing of particleboards using agricultural waste camellia oleifera shells. **Construction and Building Materials**, London, v. 424, 135922, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135922.

YOUNESI-KORDKHEILI, H.; PIZZI, A. Nanolignin, a Coupling Bio-Agent for Wood-Plastic Composites. **Journal of Renewable Materials**, Henderson, v. 11, n. 5, p. 2075-2083, 2023. DOI: 10.32604/jrm.2023.026706.

YUSOF, M.; LAMAMING, J.; HASHIM, R.; YHAYA, M. F.; SULAIMAN, O.; SELAMAT, M. E. Flame retardancy of particleboards made from oil palm trunk-poly(vinyl) alcohol with citric acid and calcium carbonate as additives. **Construction and Building Materials**, London, v. 263, 120906, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120906.

APÊNDICE A - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE IDENTIFICAÇÃO, TRIAGEM E SELEÇÃO DOS ESTUDOS (BASEADO NO PROTOCOLO PRISMA)



Fonte: Elaboração do próprio autor.