

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

ANANDA GALBIATI BARRERA DE PAULA E SILVA

**PAINÉIS AGLOMERADOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE MADEIRAS
DE PINUS SP DE INDÚSTRIA MOVELEIRA E AGLUTINADOS COM PUR E
PET**

**Ilha Solteira
2024**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANANDA GALBIATI BARRERA DE PAULA E SILVA

**PAINÉIS AGLOMERADOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE MADEIRAS DE
PINUS SP DE INDÚSTRIA MOVELEIRA E AGLUTINADOS COM PUR E PET**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Especialidade: Engenharia de Construção Civil.

Prof. Dr. Sérgio Augusto Mello da Silva

Orientador

Ilha Solteira

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

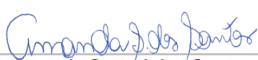
S586p Silva, Ananda Galbiati Barrera de Paula e.
Painéis aglomerados produzidos com resíduos de madeiras de *Pinus sp* de indústria moveleira e aglutinados com PUR e PET / Ananda Galbiati Barrera De Paula e Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
115 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2024

Orientador: Sérgio Augusto Mello da Silva

Inclui bibliografia

1. Painéis aglomerados. 2. *Pinus sp*. 3. Poliuretano derivado de óleo de mamona. 4. Politereftalato de etileno. 5. Resíduo industrial.


Amanda Sertori dos Santos

Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: PAINÉIS AGLOMERADOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE MADEIRAS DE PINUS SP DE INDÚSTRIA MOVELEIRA E AGLUTINADOS COM PUR E PET

AUTORA: ANANDA GALBIATI BARRERA DE PAULA E SILVA

ORIENTADOR: SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Civil, área: Estruturas pela Comissão Examinadora:



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

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

Prof. Dr. JOÃO VICTOR FAZZAN (Participação Virtual)
Departamento de Construção Civil / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP

Ilha Solteira, 21 de agosto de 2024

RESUMO

A alta demanda por recursos nas indústrias moveleiras e no setor da construção civil e o crescente índice de descarte de resíduos industriais, florestais, agroindustriais e de plásticos, tem impulsionado a realização de muitos estudos visando o aproveitamento de resíduos para agregar valor em novos produtos. Este trabalho se propõe avaliar a eficiência do adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona (PUR) em conjunto com o pó de Politereftalato de Etileno (PET) como aglutinantes em painéis produzidos com partículas de madeira, proveniente de resíduo de *Pinus sp.* As partículas demadeira serão classificadas de acordo com a granulometria proposta para produção de painéis aglomerados, ou seja, partículas com comprimento entre 2 e 10 mm, em seguida serão secas ao sol. Os painéis serão produzidos considerando-se misturas de partículas de madeira de *Pinus sp* e os aglutinantes (PUR e PET), conforme descrito na metodologia e na *definição das propostas de misturas*. O teor de umidade a ser considerado para as partículas de madeira foi de 3 e 5 % e foram produzidos 3 painéis para cada mistura com densidade nominal de 0,55 g/cm³, pressão de 5 MPa, temperatura de 160°C e 10 minutos de tempo de prensagem. As propriedades físicas e mecânicas foram avaliadas de acordo com os documentos normativos da NBR 14810-2:2018, ANSI A208.1 (2016) e referências bibliográficas nacionais e internacionais. Internacionais e para os principais resultados verificou-se que os valores de adesão interna foram bem significativos nos painéis das misturas 1 (75% *Pinus sp*, 15% PET e 10% PUR) e 3 (65% *Pinus sp*, 30% PET e 5% PUR), pois os painéis apresentaram resultados para serem classificados pela norma ABNT NBR 14810-2:2018 e misturas 1 (75% *Pinus sp*, 15% PET e 10% PUR), 2 (50% *Pinus sp*, 40% PET e 10% PUR), 3 (65% *Pinus sp*, 30% PET e 5% PUR) e 4 (40% *Pinus sp*, 55% PET e 5% PUR), devido aos painéis apresentarem resultados para serem classificados pela ANSI A2081.

Palavras-chave: painéis aglomerados; *Pinus sp*; poliuretano derivado de óleo de mamona; politereftalato de etileno; resíduo industrial.

ABSTRACT

The high demand for resources in the furniture and construction industries and the increasing disposal rates of industrial, forestry, agro-industrial, and plastic waste have driven numerous studies aimed at utilizing waste to add value to new products. This study aims to evaluate the efficiency of castor oil-derived polyurethane adhesive (PUR) in combination with Polyethylene Terephthalate (PET) powder as binders in panels produced with wood particles from *Pinus* sp. waste. The wood particles will be classified according to the particle size proposed for particleboard production, i.e., particles with lengths between 2 and 10 mm, and then sun-dried. The panels will be produced considering mixtures of *Pinus* sp. wood particles and binders (PUR and PET), as described in the methodology and the definition of the proposed mixtures. The moisture content considered for the wood particles was 3 and 5%, and 3 panels were produced for each mixture with a nominal density of 0.55 g/cm³, a pressure of 5 MPa, a temperature of 160°C, and 10 minutes of pressing time. The physical and mechanical properties were evaluated according to the normative documents NBR 14810-2:2018, ANSI A208.1 (2016), and national and international bibliographic references. For the main results, it was found that the internal adhesion values were very significant in the panels of mixtures 1 (75% *Pinus* sp, 15% PET e 10% PUR) and 3 (65% *Pinus* sp, 30% PET e 5% PUR), as the panels presented results to be classified by the ABNT NBR 14810-2:2018 standard, and mixtures 1 (75% *Pinus* sp, 15% PET e 10% PUR), 2 (50% *Pinus* sp, 40% PET e 10% PUR), 3 (65% *Pinus* sp, 30% PET e 5% PUR), and 4 (40% *Pinus* sp, 55% PET e 5% PUR) due to the panels presenting results to be classified by ANSI A208.1.

Keywords: particleboard, *Pinus* sp; polyurethane derived from castor oil; polyethylene terephthalate; industrial waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição florestal brasileira por estado e por gênero cultivado.	16
Figura 2 - Consumo aparente brasileiro de painéis de madeira - 1.000 m ³	20
Figura 3 - Distribuição de empresas de painéis (MDP, MDF e Chapa de Fibra).	21
Figura 4 - Cadeia produtiva dos painéis aglomerados.	22
Figura 5 – Esquemas de distribuição de partículas dos painéis aglomerados.	24
Figura 6 – Pós-consumo de PET no Brasil.	41
Figura 7 – Destinação e consumidores do PET no Brasil.	42
Figura 8 – Geração de resíduo moveleiro no processo de usinagem.	51
Figura 9 – Volume de resíduo gerado diariamente por indústria moveleira.	52
Figura 10 – Partículas de Pinus sp descartadas por indústria moveleira.	52
Figura 11 – Agitador elétrico de peneiras.	56
Figura 12 – Conjunto de peneiras para determinação da composição granulométrica.	57
Figura 13 – Balança térmica para determinação do teor de umidade das partículas.	59
Figura 14 – Ilustração das etapas para produção dos painéis.	60
Figura 15 – Desenho esquemático do cp para determinação da densidade.	61
Figura 16 – Desenho esquemático do cp para o ensaio de Flexão Estática.	64
Figura 17 – Desenho esquemático para a realização do ensaio de flexão.	66
Figura 18 - Posicionamento de corpo de prova para ensaio de tração perpendicular.	68
Figura 19 – Etapas para produção de um painel de partículas em prensa hidráulica com controle de temperatura e pressão.	69
Figura 20 – Curva "S" para composição granulométrica do PET.	73
Figura 21 – Curva "S" para composição granulométrica do PET.	75
Figura 22 – MEV da mistura com 75% Pinus, 15% PET e 10% de PUR; (a) imagem com a definição maior; (b) imagem com a definição menor.	97
Figura 23 – MEV da mistura com 50% Pinus, 40% PET e 10% de PUR; (a) imagem com a definição maior; (b) imagem com a definição menor.	98
Figura 24 – MEV da mistura com 65% Pinus, 30% PET e 5% de PUR; (a) imagem com a definição maior; (b) imagem com a definição menor.	98
Figura 25 – MEV da mistura com 40% Pinus, 55% PET e 5% de PUR; (a) imagem com a definição maior; (b) imagem com a definição menor.	99
Figura 26 – MEV da mistura com 50% Pinus, 50% PET e 0% de PUR; (a) imagem com a definição maior; (b) imagem com a definição menor.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores mínimos das propriedades físicas e mecânicas informados pela norma NBR 14810-2 (2018) e suas classificações.....	23
Tabela 2 – Propriedades físicas e mecânicas de espécies de Pinus.	29
Tabela 3 – Produção e reciclagem de plástico no mundo em toneladas.	39
Tabela 4 – Propriedades físicas e mecânicas do PET.	41
Tabela 5 – Propostas de misturas para produção dos painéis aglomerados.	54
Tabela 6 – Composição granulométrica das partículas de PET.....	73
Tabela 7 – Composição granulométrica das partículas de Pinus.....	74
Tabela 9 – Teor de umidade das partículas de Pinus e PET.	76
Tabela 10 – Massa específica das partículas de Pinus e PET.....	76
Tabela 11 – Classificações normativas de Densidade.	77
Tabela 11 – Densidade das misturas e classificações normativas segundo ABNT NBR 14810-2 (2018) e ANSI A208.1 (2016).	77
Tabela 12 – Síntese dos resultados das densidades e dos teores de umidade.....	79
Tabela 13 – Síntese dos resultados das absorções e inchamentos após 24h.	81
Tabela 14 – Resultados médios de MOR, CV e Desvio padrão.....	82
Tabela 15 – Resultados médios para MOE, CV e Desvio padrão.....	83
Tabela 16 – Valores médios para o ensaio de Tração Perpendicular (TP), CV e Desvio padrão para respectivas misturas.	85
Tabela 17 – Síntese dos resultados de MOE, MOE e TP dos painéis fabricados.....	86
Tabela 18 – Resultados do teste de contraste de médias de Tukey das propriedades físicas e mecânicas afetadas pelos teores de partículas de madeira de Pinus.....	87
Tabela 19 – Resultados do teste de contraste de médias de Tukey das propriedades físicas e mecânicas afetadas pelos teores de partículas de PET.....	88
Tabela 20 – Resultados do teste de contraste de médias de Tukey das propriedades físicas e mecânicas afetadas pelos teores do adesivo PUR.	89
Tabela 21 – Análise dos resultados obtidos nas propriedades dos painéis e suas respectivas misturas.....	90
Tabela 22 – Limites estabelecidos pela ABNT NBR 148410-2 (2018) para classificação dos painéis e apresentação de Mistura que atendeu a cada classificação.	91
Tabela 23 – Legendas de siglas e orientações de uso das classificações conforme NBR 148410-2 (2018).	92
Tabela 24 – Requisitos normativos da ANSI A208.1 (2016) e as respectivas classificações das misturas.	93
Tabela 25 – Legendas de siglas e orientações de uso das classificações conforme ANSI A208.1 (2016).	94
Tabela 26 – Propriedades físicas e mecânicas das misturas.....	95
Tabela 27 – Propostas de misturas para produção dos painéis aglomerados.	95

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral.....	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Panorama do setor florestal brasileiro	15
3.2	Painéis à base de madeira	16
3.3	Painéis Aglomerados.....	17
3.4	Definição.....	18
3.5	Produção, Fabricação e Classificação	19
3.6	Propriedades e parâmetros relacionados ao desempenho dos painéis	24
3.7	Densidade	25
3.8	Geometria das partículas.....	26
3.9	Teor de umidade das partículas	26
3.10	Pressão, tempo e temperatura de prensagem	28
3.11	Madeira Pinus sp.....	28
3.12	Resíduos madeireiros na fabricação dos painéis	31
3.13	Adesivos	33
3.14	Adesivo bicomponente poliuretano derivado de mamona (PUR)	34
3.15	Polímeros Plásticos	37
3.16	PET (Politereftalato de Etileno)	40
3.16.1	Madeira plástica produzida com termoplásticos reciclados	43
3.16.2	Painéis aglomerados com PET reciclado	46
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
4.1	Materiais	51
4.1.1	Madeira de Pinus sp.....	51
4.1.2	Adesivo poliuretano bicomponente derivado de mamona (PUR)	53
4.1.3	Politereftalato de Etileno (PET)	53
4.2	Métodos.....	53
4.2.1	Definição das propostas de misturas.....	53
4.2.2	Preparação dos resíduos	55
4.2.3	Classificação granulométrica das partículas.....	56

4.2.4	Ensaio para determinação da composição granulométrica das propostas de madeira	56
4.2.5	Umidade das partículas.....	58
4.2.6	Produção dos painéis aglomerados	59
4.2.7	Ensaio físicos.....	61
4.2.7.1	Densidade (D)	61
4.2.7.2	Umidade (U)	62
4.2.7.3	Inchamento em espessura após 24h (I24h) e Absorção de água após 24 h (A24h)	63
4.2.8	Ensaio mecânicos.....	64
4.2.8.1	Ensaio de flexão estática.....	64
4.2.8.2	Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR)	65
4.2.8.3	Módulo de Elasticidade (MOE)	66
4.2.8.4	Resistência à Tração Perpendicular (TP)	67
4.2.9	Produção dos painéis aglomerados	68
4.2.10	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	70
4.2.11	Análise estatística	71
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	72
5.1	Composição granulométrica	72
5.2	Umidade das partículas	75
5.3	Massa específica das partículas.....	76
5.4	Densidade	76
5.5	Teor de umidade dos painéis	78
5.6	Inchamento em espessura após 24h (I24h) e Absorção de água após 24h (A24h).....	79
5.7	Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR)	81
5.8	Módulo de Elasticidade (MOE)	82
5.9	Resistência à Tração Perpendicular (TP)	84
5.10	Classificação de acordo com ABNT NBR 14810-2 (2018) e ANSI A208.1(2016).....	89
5.11	Considerações.....	94
5.12	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	96
5.12.1	Análise dos painéis da Mistura 1 (75% Pinus sp , 15% PET e 10% PUR) .	96
5.12.2	Análise dos painéis da Mistura 2 (50% Pinus ssp, 40% PET e 10% PUR)	97

5.12.3	Análise do painéis da Mistura 3 (65% Pinus sp, 30% PET e 5% PUR)	98
5.12.4	Análise dos painéis da Mistura 4 (40% Pinus sp, 55% PET e 5% PUR)	99
5.12.5	MEV – Mistura 5 (50% Pinus sp, 50% PET e 0% PUR)	99
6	CONCLUSÃO	101
	REFERÊNCIAS	103

1 INTRODUÇÃO

O uso racional dos recursos naturais é de crucial importância para a bioeconomia e é um dos princípios fundamentais dos objetivos de desenvolvimento sustentável (Pedzik *et al.*, 2021).

Com o crescimento populacional e o incentivo na otimização da madeira maciça, a busca por matérias-primas alternativas vem sendo cada vez mais visadas em muitos setores, principalmente no setor moveleiro e na construção civil (Basboga *et al.* 2023).

Segundo o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES, 2014), a escassez de madeira decorrente dos desmatamentos das florestas naturais ao longo do tempo e as limitações de seu uso na forma natural, devido a problemas de heterogeneidade e anisotropia, também incentivaram os estudos sobre sua utilização de maneira racional possibilitando maior aproveitamento da matéria-prima.

Conforme dados mais recentes do Instituto de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), a produção de madeira em tora foi de 286,2 milhões de m³ no território brasileiro, enquanto o consumo aparente de madeira foi de 211,5 milhões de m³. Esse valor representa uma redução em relação aos anos anteriores, resultado da queda da produção de madeira nativa e do aumento do consumo de madeira de plantações florestais.

Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria de Móveis (ABIMÓVEL, 2020) e Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI, 2020), dentre os maiores consumidores de madeira no território nacional, o setor moveleiro se destaca com o consumo aproximado de 8,8 milhões de m³ em tora e a construção civil com o consumo de 8,3 milhões de m³ no ano de 2020. Esse número representa um crescimento de 5,7% em relação ao ano anterior.

De acordo com o Sistema Nacional de Informações Florestais, o setor florestal brasileiro é responsável por 7,3% (US\$ 10,3 bilhões) das exportações totais do país e representa cerca de 3,5% (US\$ 37,3 bilhões) do PIB – Produto Interno Bruto brasileiro. O seguimento de madeira serrada, compensados e subprodutos, por sua vez, representa um total de US\$ 2,9 bilhões para a economia, o que demonstra sua relevância no cenário da economia nacional (SNIF, 2020).

Considerando promover a iniciativa do manejo florestal responsável e maximizar seu aproveitamento, uma das formas de utilizar os materiais oriundos da

produção florestal é a produção dos painéis aglomerados, de forma a conceder um destino mais nobre às madeiras de dimensões ou qualidades inferiores (Guimarães Júnior, 2008).

Os painéis de madeira reconstituída são produzidos a partir de diferentes etapas de desagregação da madeira e incorporados por adição de adesivos sintéticos, submetidos à ação de pressão e temperatura constante, para conformação de chapas que possibilitam uma ampla gama de aplicabilidade, sendo as principais aplicações no setor moveleiro, fabricação de pisos e na construção civil (Araújo *et al.*, 2019; Iwakiri; Trianoski, 2020; Mendes .,2012; Bertolini *et al.*, 2011).

Segundo a Associação Brasileira de Indústria de Painéis de Madeira (ABIPA, 219), a produção de painéis aglomerados no Brasil obteve um crescimento significativo na última década. Em 2010, a produção nacional foi de 6,8 milhões de m³, enquanto em 2019, esse número alcançou a marca de 11,6 milhões de m³, representando um aumento de aproximadamente 70% em 10 anos.

Dentre suas vantagens, os painéis de madeira aglomerada constituídos de resíduos e sobras de madeira provenientes do processo de produção no setor industrial possibilitam agregar valor, promover o aproveitamento integral da matéria-prima, evitar o descarte inapropriado do resíduo e principalmente, proporcionar a criação de novos produtos com valor agregado capazes de atender às demandas do mercado.

Embora ainda seja incomum na indústria, a utilização de resíduos de madeira apresenta potencial econômico, pois tais resíduos podem servir como formadores da matriz principal do produto em painéis de MDF (*Medium Density Fiberboard*) e MDP (*Medium Density Particleboard*) (Araújo *et al.*, 2019).

Segundo a Revista da Madeira (REMADE, 2014), no decorrer dos anos surgiram inovações no setor industrial como desenvolvimento de prensas contínuas, que permitiram maior produtividade e menores custos de produção e, a partir do avanço tecnológico e majoração na capacidade de produção, provocaram o aumento da flexibilidade operacional das fábricas de painéis de madeira reconstituída.

Perante a alta demanda de mercado e em função das demandas para atendimento da sustentabilidade, as indústrias moveleiras e áreas correlacionadas da construção civil, buscam em seus processos industriais elementos que tragam alternativas em relação à madeira sólida, considerando os aspectos de rendimento em relação ao volume, a diminuição da anisotropia e novas aplicabilidades da matéria-

prima.

Dentre os estudos relacionados a utilização de matéria-prima alternativa, a maravalha proveniente do processo de torneamento da madeira maciça na indústria moveleira, é um dos principais resíduos gerados no processamento mecânico da madeira, e, para utilização na produção de painéis convencionais, necessita de processos de redução e classificação de suas partículas (Silva, 2018).

Além dos resíduos moveleiros, existem outros materiais alternativos que podem ser incorporados e proporcionar melhorias nas propriedades dos painéis aglomerados, dentre eles o PET (polímero termoplástico) é um material resistente e mundialmente abundante devido às inúmeras aplicabilidades em embalagens, fibras têxteis, artigos decorativos, entre outros. Porém, devido ao crescente consumo mundial e ao descarte inapropriado desse material, 40% dos resíduos oriundo de garrafas PET não são reciclados e acabam em lixões, aterros sanitários ou no meio ambiente, levando até 400 anos para se decompor (Ocean Conservancy, 2020).

A partir deste cenário, a utilização de resíduo de PET na fabricação de painéis aglomerados tem sido objeto de estudos e pesquisas em diversas partes do mundo a fim de reduzir os impactos ambientais e proporcionar melhorias nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis aglomerados, conforme pode ser evidenciado nos estudos de Prado *et al.* (2021), Moreira *et al.* (2020), Chen *et al.* (2020), Miao *et al.* (2020), entre outros.

Em relação aos adesivos comumente utilizados na fabricação dos painéis aglomerados no Brasil, o adesivo sintético à base de Ureia Formaldeído (UF) é uma resina que necessita de muito cuidado no manuseio, pois, apresenta vários aspectos negativos em suas propriedades, como a produção de gás formaldeído quando aquecido e a baixa resistência à umidade, devido sua toxidez é considerado prejudicial ao meio ambiente e ao ser humano (Gilio, 2020).

Visando a busca por materiais alternativos e sustentáveis, o adesivo Poliuretano obtido a partir do óleo de mamona (PUR) tem se constituído de uma alternativa em substituição à resina Ureia Formaldeído (UF) nos painéis aglomerados. Isso se deve ao fato de que, diferentemente dos adesivos à base de formol, os gases produzidos pelo poliuretano são menos prejudiciais à saúde humana.

Considerando-se os aspectos que envolve a produção de painéis aglomerados, essa pesquisa propõe analisar a viabilidade de sua produção a partir da utilização da maravalha de *Pinus sp* proveniente de processamento em indústrias moveleiras e

empresas madeireiras, que para a produção dos painéis foi aglutinados com PUR, PET e Resina de Pinus sp para a produção dos painéis aglomerados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho será estudar a produção de painéis aglomerados utilizando resíduos de *Pinus sp.* Serão avaliadas as propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos a partir de resíduos de madeira de reflorestamento, empregando PUR em conjunto com misturas de pó de PET e pó de resina de Pinus.

2.2 Objetivos Específicos

Para a produção e avaliação dos painéis, foram considerados os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar painéis aglomerados de madeira contendo composições de resíduos de Pinus, pó de PET e pó de resina de Pinus, seguindo os parâmetros normalizados para a avaliação de painéis de média densidade.
- Investigar a influência do uso de pó de PET e pó de resina de Pinus nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis.
- Realizar avaliações das propriedades físicas e mecânicas conforme os padrões estabelecidos na ABNT NBR 14810-2:2018 e ANSI A208.1:2016, que especificam os ensaios necessários e os procedimentos para a avaliação dos painéis.
- Realizar análises comparativas com os resultados obtidos nos estudos bibliográficos sobre o assunto.
- Efetuar a classificação dos painéis produzidos conforme as diretrizes da ABNT NBR 14810-2:2018 e ANSI A208.1:2016.
- Realizar uma análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas dos painéis, considerando as diferentes misturas propostas.
- Examinar a morfologia dos painéis por meio de imagens obtidas via microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica, abordaram-se dois tipos principais de tópicos. Primeiramente, apresentou-se a fundamentação teórica que embasou o tema da pesquisa, discutindo-se os conceitos e princípios fundamentais que orientaram o estudo. Em seguida, exploraram-se pesquisas correlatas, analisando-se trabalhos acadêmicos e científicos que contribuíram para o desenvolvimento do conhecimento na área, fornecendo um panorama abrangente das descobertas e lacunas existentes. Esses subtópicos foram estruturados para proporcionar uma visão clara e abrangente do estado da arte, situando a pesquisa no contexto acadêmico da época.

3.1 Panorama do setor florestal brasileiro

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), o setor florestal brasileiro é um dos mais importantes da economia do país, com um papel significativo na geração de empregos e na contribuição para o PIB. De acordo com dados, o Brasil possui uma área total de 519,5 milhões de hectares de florestas, correspondendo a aproximadamente 60% do território nacional. Dentre a área total, 449,6 milhões de hectares representam florestas naturais e 69,9 milhões de hectares florestas plantadas.

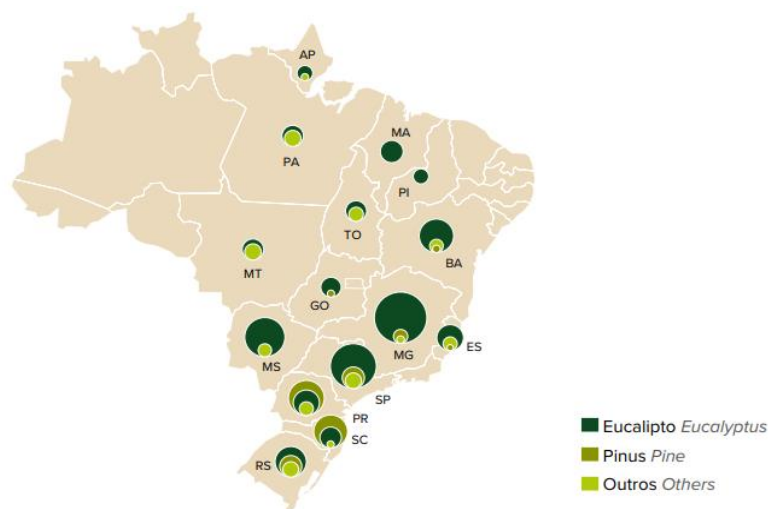
De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2020), a produção do setor florestal brasileiro se divide principalmente em celulose, papel, madeira serrada, painéis de madeira e compensado. No ano de 2020, a produção de celulose no país alcançou 20,5 milhões de toneladas, enquanto a produção de papel atingiu 10,8 milhões de toneladas. Além disso, a produção de painéis de madeira totalizou 9,5 milhões de m³, sendo que os painéis de MDP (*Medium Density Particleboard*) corresponderam a 51% desse total.

O Brasil possui um forte programa de manejo florestal sustentável, com um crescimento expressivo na área de florestas plantadas. Em 2019, o total de áreas plantadas foram cerca de 11,6 milhões de hectares, nos quais as espécies de Eucalipto e Pinus foram as mais plantadas, correspondendo respectivamente a 7,8 milhões e 2,6 milhões de hectares, representando um aumento de 2,3% em relação ao ano anterior (SNIF, 2020).

A Figura 1 ilustra a distribuição florestal brasileira por estado e por gênero

cultivado, de acordo com levantamento da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2020).

Figura 1 - Distribuição florestal brasileira por estado e por gênero cultivado.



Fonte: IBÁ (2020)

Na Figura 1 verifica-se que a distribuição de florestas plantadas no território nacional não é homogênea e estão concentradas nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. As florestas plantadas de Eucalipto, predominantes em relação aos outros gêneros, ocorrem essencialmente nos estados de Minas Gerais (22%), São Paulo (16%) e Mato Grosso do Sul (13%) e Paraná (11%). Já os plantios de Pínus são predominantes nos estados do Paraná (44%), Santa Catarina (26%), Rio Grande do Sul (17%) e São Paulo (9%) (IBÁ, 2020).

Apesar dos avanços, o setor florestal brasileiro ainda enfrenta desafios importantes, como a ausência de investimento em tecnologias e pesquisas, a ausência de infraestrutura e logística para transporte dos produtos e a complexidade da legislação ambiental. No entanto, a busca por soluções sustentáveis e a adoção de práticas responsáveis de manejo florestal são fundamentais para garantir a continuidade do desenvolvimento do setor no país.

3.2 Painéis à base de madeira

Os painéis à base de madeira, conhecidos também como compósitos à base de madeira, são produtos que incorporam madeira e outros materiais, como resinas sintéticas, plásticos e metais, formando um material híbrido. Podem ser produzidos por diferentes processos, como moldagem por compressão, extrusão e injeção, e

possuem uma ampla gama de aplicações, como na construção civil, na indústria moveleira, indústria automotiva e na produção de embalagens. Os compósitos à base de madeira apresentam vantagens em relação a outros materiais, sendo a sua baixa densidade, resistência mecânica e térmica, além de serem resistentes à umidade e à deterioração biológica (Gupta et al., 2015).

De acordo com Stark *et al.* (2021), o elemento básico para os compósitos à base de madeira é a fibra lignocelulósica, que pode ser utilizada em chapas maiores compostas de muitas fibras, partículas ou fibras unitárias. Os elementos típicos produzidos incluem fibras, partículas, flocos, folheados e laminados, onde o tamanho e a geometria dos elementos ditam em grande parte o produto final fabricado e seu desempenho.

O conjunto de compósitos à base de madeira são classificados em: compensados, aglomerado orientado, aglomerado de partículas e aglomerado de fibras (Maloney, 1986).

Segundo Gonçalves *et al.* (2018), os painéis podem ser produzidos com misturas de espécies de madeira, com adição de polímeros, resíduos agroindustriais, componente lignocelulósico ou resíduos madeireiros. Substituições e adições de produtos ao processo de produção objetivam melhorar as propriedades dos painéis, como também substituir o uso da madeira, procurando meios de produzir materiais mais ecológicos e reduzir o desperdício (Gonçalves *et al.*, 2018).

Neste cenário, os painéis à base de madeira são materiais importantes para diferentes setores da indústria, oferecendo soluções para diversas aplicações devido às suas propriedades físicas e mecânicas (Gonçalves *et al.*, 2018).

3.3 Painéis Aglomerados

Segundo Gupta *et al.* (2015), a primeira aplicação de aglomerados de madeira ocorreu em 1907, quando H. A. Browne utilizou serragem e resina termofixa para produzir blocos de madeira aglomerada, contudo, os painéis de partículas compostos de madeira obtiveram maior relevância durante a Segunda Guerra Mundial em 1941, após a escassez de madeira sólida na Europa. Os primeiros painéis de partículas eram feitos de lascas de madeira e serragem unidas com uma cola à base de caseína (Liu *et al.*, 2019).

De acordo com Nascimento, Lahr e Christoforo (2015), entre 1943 e 1944, duas

empresas foram criadas com o intuito de utilizar o resíduo de serraria para a fabricação de painéis, além de desenvolverem as primeiras chapas para prensagem dos painéis.

Iwakiri (2005) relata que um dos motivos para o surgimento dos painéis aglomerados foi a necessidade de se utilizar resíduos provenientes da produção dos painéis compensados. Onde, a partir de 1946, após o término da guerra, as indústrias retomaram a fabricação de painéis aglomerados nos Estados Unidos. E, em meados da década de 1970, ocorreu a expansão das instalações industriais e grandes avanços tecnológicos, resultando no desenvolvimento de chapas estruturais mais resistentes dos tipos *waferboard* e *oriented strand board (OSB)*.

No Brasil, a produção de painéis de madeira iniciou com a produção de chapas de madeira compensada em 1940. Posteriormente, a partir da década de 1960, iniciou-se a produção de painéis de partículas, seguida da produção de painéis MDF e OSB na década de 1980 (Brito *et al.*, 2019).

A partir da metade da década de 1990, após investimentos em modernização tecnológica das empresas brasileiras, o procedimento de prensagem dos painéis, que era realizado de forma cíclica, passou a ser contínua, melhorando as características de resistência do produto. Sendo assim, na tentativa de dissociar o novo produto do aglomerado tradicional, ocorreu a modificação da nomenclatura de aglomerado para MDP (*Medium Density Particleboard*). Entretanto, a sigla MDP ainda é frequentemente referenciada pelo termo aglomerado em algumas fontes bibliográficas e também no meio industrial (Trianoski, 2010).

Atualmente, a fabricação de painéis aglomerados no Brasil tem crescido consideravelmente, com novos investimentos e a modernização das indústrias já existentes. A produção nacional de painéis aglomerados tem se destacado no mercado internacional (Carradori *et al.*, 2012).

3.4 Definição

De acordo com Iwakiri (2020), os painéis de madeira aglomerada são produzidos com pequenas partículas de madeira, incorporando um adesivo sintético e reconstituídos numa matriz randômica onde são consolidados através da aplicação de calor e pressão.

Segundo a *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2016), os painéis de partículas são definidos como um termo genérico para painéis compósitos

constituídos por materiais celulósicos geralmente no formato de pequenas partículas, coladas entre si com um sistema de colagem que pode conter aditivos.

Para a Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT BR 14810-1 (2013), os painéis de partículas são constituídos de partículas de madeira aglutinada com resina sintética termofixa que se consolidam sob a ação conjunta de calor e pressão.

Com base na Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira (ABIPA, 2021), os painéis aglomerados podem ser produzidos a partir de diferentes tipos de madeira, como pinus, eucalipto, entre outros, e possuem uma grande variedade de usos, desde construções residenciais e comerciais até a fabricação de móveis e decoração.

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), a produção de painéis de madeira no Brasil foi de aproximadamente 7,1 milhões de m³ em 2020, sendo que 1,7 milhões de m³ foram de painéis de madeira aglomerada.

A *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2022) define que painéis aglomerados podem ser produzidos em diferentes densidades e espessuras e, são amplamente utilizados na indústria de móveis, construção civil e outras aplicações onde se requer um material de alta resistência mecânica e estabilidade dimensional.

Segundo o Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES, 2014), as matérias-primas empregadas na fabricação dos painéis de madeira aglomerada compreendem praticamente qualquer fonte de fibra e materiais lignocelulósicos.

Ainda de acordo com BNDES (2014), do ponto de vista comercial, a qualidade do produto final limita o campo de escolha. A resina normalmente utilizada para aglutinação das partículas é a ureia-formaldeído, usando-se também, quando há necessidade de melhores características de resistência, o fenol-formaldeído. Durante o processo de produção são adicionados diversos produtos químicos para evitar o mofo, a umidade e o ataque de insetos, bem como aumentar a resistência ao fogo.

3.5 Produção, Fabricação e Classificação

Segundo a FAO (2021), a produção mundial de painéis aglomerados em 2020 foi de cerca de 153 milhões de m³, representando um aumento de 4% em relação ao

ano anterior.

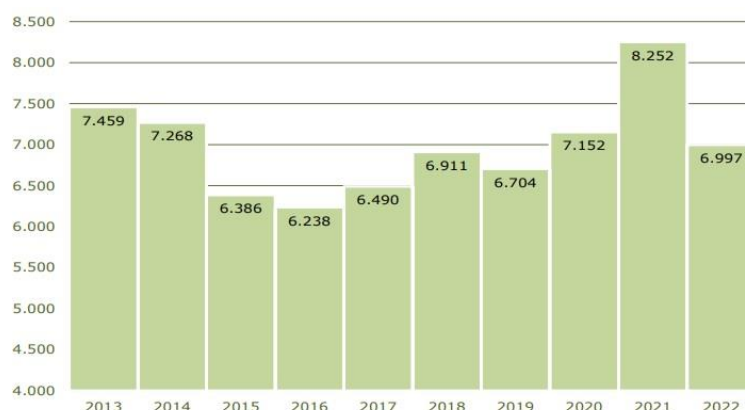
A Ásia é a região líder na produção desses painéis, respondendo por cerca de 58% da produção mundial, seguida pela Europa (24%) e América do Norte (11%). O Brasil representa cerca de 1% da produção mundial, com uma produção de aproximadamente 1,4 milhão de m³ em 2020 (FAO, 2021).

De acordo com dados da ABIPA (2020), a produção de painéis de madeira no Brasil aumentou de 7,89 milhões de m³ em 2018 para 8,3 milhões de m³ em 2019, representando um aumento de cerca de 5%.

Considerando o consumo dos principais tipos de painéis aglomerados relacionado à cultura de cada região, os painéis compensados são utilizados predominantemente na região asiática-pacífico, principalmente na China, enquanto o OSB, Aglomerado e MDF são utilizados principalmente na América do Norte e na Europa (FAO, 2016).

Segundo o Instituto Brasileiro da Madeira e das Estruturas de Madeira (IBÁ, 2022) e conforme pode ser verificado na Figura 2, o consumo aparente de painéis de madeira foi cerca de 7 milhões de m³ em 2022, o que representa uma queda de 15% em relação ao ano anterior. Essa diminuição é atribuída principalmente à queda da demanda no setor da construção civil devido a desaceleração econômica mundial e acanhado crescimento do consumo brasileiro perante a instabilidade econômica e política em que se encontra.

Figura 2 - Consumo aparente brasileiro de painéis de madeira - 1.000 m³

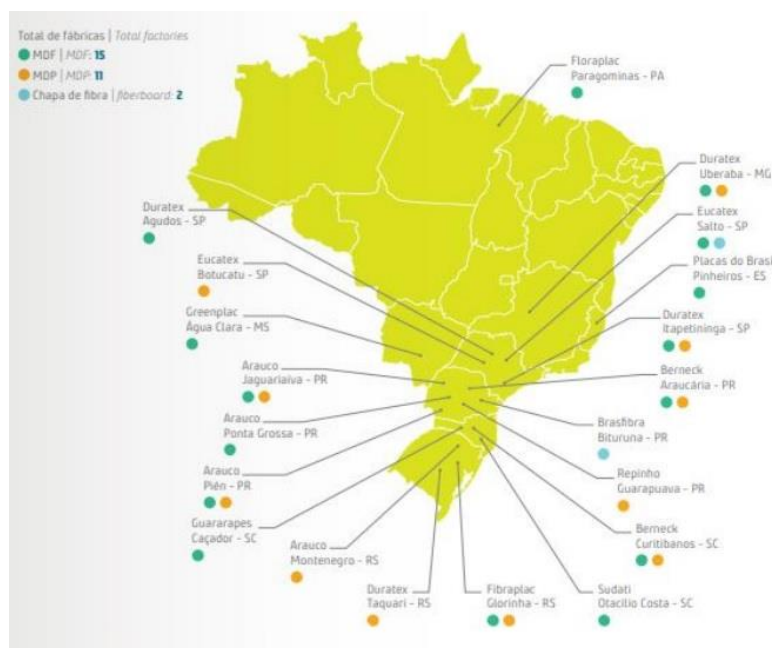


Fonte: IBÁ (2022)

Atualmente as principais empresas do mercado que produzem painéis à base de madeira no Brasil são as Indústrias: Arauco S/A, Berneck S/A Painéis e Serrados,

Berneck A Marca da Madeira, Eucatex S/A Indústria e Comércio, Fibraplac Tecnologias em Painéis e Masisa Mais Confiança. O Brasil detém apenas 2% da produção de painéis particulados, sendo que a Alemanha (17%) e os Estados Unidos (14%) são os principais produtores (Nascimento; Lahr; Christoforo, 2015). A Figura 3 ilustra a distribuição das empresas produtoras de painéis no Brasil.

Figura 3 - Distribuição de empresas de painéis (MDP, MDF e Chapa de Fibra)



Fonte: adaptado de IBÁ (2020)

De acordo com dados da ABIPA (2021), a distribuição das empresas produtoras de painéis no Brasil se concentra em 67,4% na região sul, 24,6% na região sudeste, 3,6% região nordeste e 3,3% na região centro-oeste e norte do território nacional.

Dentre os painéis aglomerados, o MDP é geralmente indicado para a produção de móveis residenciais e comerciais de linhas retas em razão das suas características dimensionais, físicas e mecânicas. São aplicados principalmente em portas retas, laterais de móveis, prateleiras, divisórias, tampos, bases, frentes e laterais de gaveta (IBÁ, 2017).

Segundo Cazella (2022), a demanda e produção destes painéis estão diretamente relacionadas ao crescimento da construção civil, visto que, com o aumento no fluxo deste setor, cresce a necessidade de itens mobiliários produzidos

com painéis aglomerados.

Do ponto de vista da cadeia produtiva brasileira e conforme ilustrado na Figura 4, o processo fabril dos painéis de madeira aglomerada atende às seguintes etapas: remoção da casca, preparação e geração das partículas, classificação de partículas, secagem, aplicação de adesivos e aditivos químicos, formação do colchão de partículas, pré-prensagem, prensagem a quente, resfriamento/acondicionamento, acabamento, classificação do painel, embalagem e, por fim, armazenamento. (Iwakiri, 2005; Trianoski, 2020).

Figura 4 - Cadeia produtiva dos painéis aglomerados



Fonte: Adaptado de Iwakiri (2005).

Em relação à classificação, os painéis de partículas de média densidade são classificados em seis tipos, considerando suas características de resistência às cargas e a umidade do ambiente a qual pode ser utilizado. A seguir observa-se a classificação dos painéis MDP de acordo com a ABNT.

- i. P2 – Painéis não estruturais para uso interno em condições secas;
- ii. P3 – Painéis não estruturais para uso em condições úmidas;
- iii. P4 – Painéis estruturais para uso em condições secas;
- iv. P5 – Painéis estruturais para uso em condições úmidas;
- v. P6 – Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições secas;
- vi. P7 – Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições úmidas.

A classificação é definida pelas propriedades físicas e mecânicas obtidas através de ensaios normativos da ABNT NBR 14810-1 (2013) e ABNT NBR 14810-2 (2018). Em relação às características mecânicas, são analisados os valores de resistência à flexão estática (MOR) e de elasticidade (MOE), resistência à tração perpendicular ou ligação interna (TP) e arrancamento de parafuso (AP). Já no caso das características físicas, são analisados os parâmetros relacionados a espessura, largura, comprimento, densidade aparente, retilineidade, teor de umidade e inchamento em espessura após 24 horas (I 24).

Na Tabela 1, estão apresentados os valores mínimos das propriedades físicas e mecânicas definidos pela ABNT NBR 14810-2 (2018) e suas respectivas classificações:

Tabela 1 – Valores mínimos das propriedades físicas e mecânicas informados pela norma NBR 14810-2 (2018) e suas classificações

Classificação	I 24 (%)	TU (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	TP (MPa)
P2	22	5-13%	11	1.800	0,40
P3	17	5-13%	15	2.050	0,45
P4	16	5-13%	16	2.300	0,40
P5	11	5-13%	18	2.550	0,45
P6	16	5-13%	20	3.150	0,60
P7	10	5-13%	22	3.350	0,75

Fonte: Autoria própria.

No cenário internacional, a norma ANSI A 208.1(2016) classifica os painéis em cinco tipos, de acordo com os parâmetros físicos e mecânicos:

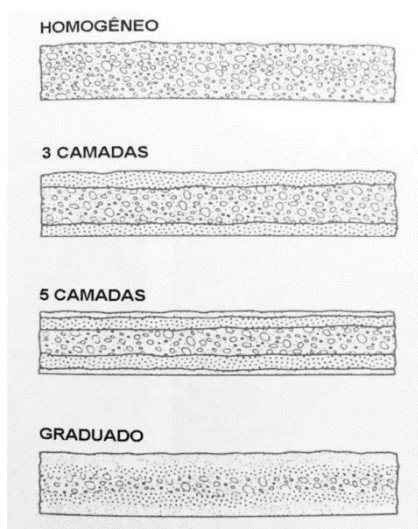
- i. H (*High Density*–Alta Densidade);
- ii. M (*Medium Density* – Média densidade);
- iii. LD (*Low Density* – Baixa Densidade);
- iv. D (*Manufactured Home Decking* – Decks Caseiros Fabricados);
- v. PBU (*Underlayment* – Subpavimento).

Além das classificações mencionadas, são acompanhados de um segundo dígito, variando de 0, 1, 2 ou 3, indicando o grau de identificação, sendo o dígito 3 correspondente ao requisito mais exigente, referente às características especiais de durabilidade, como também de resistência mecânica MOR, MOE e TP e, o dígito 0 referente ao requisito mínimo de desempenho para se enquadrar na norma.

Referente a classificação em função da densidade dos painéis, são considerados painéis de baixa densidade aqueles que possuem até $0,551 \text{ g/cm}^3$ de densidade nominal, de $0,551$ a $0,750 \text{ g/cm}^3$ para média densidade e acima de $0,750 \text{ g/cm}^3$ para alta densidade (Iwakiri, 2005).

Quanto ao método de distribuição de partículas e conforme Figura 5, os painéis aglomerados podem ser classificados em três grupos: Homogêneos, Multicamadas (Heterogêneo) e Camadas Graduadas. Formados com uma única camada com distribuição uniforme das partículas em toda sua estrutura, distribuição por camadas ou níveis com variação da granulometria, sendo as camadas internas constituídas de partículas de maior dimensão e por fim, distribuição gradual das partículas de diferentes granulometrias com partículas menores nas faces e maiores no centro (Iwakiri, 2020; Moslemi 1974).

Figura 5 – Esquemas de distribuição de partículas dos painéis aglomerados



Fonte: Iwakiri (2020)

3.6 Propriedades e parâmetros relacionados ao desempenho dos painéis

As propriedades físicas e mecânicas, bem como os parâmetros de produção estão diretamente relacionadas ao desempenho dos painéis, a seguir estão descritas suas principais características.

3.7 Densidade

Dentre as características variáveis que influenciam o desempenho de um painel de partículas, a densidade da madeira é considerada o fator mais importante a se observar na matéria-prima, pois influencia de forma significativa as propriedades dos painéis e seu processo de produção. Espécies de baixas densidades podem propiciar maior módulo de elasticidade, adesão interna, resistência à flexão, e melhor qualidade de colagem do painel produzido (Maloney, 1977; Araújo *et al.*, 2019).

Além da densidade, existem diversos outros fatores que contribuem para a conformação das propriedades e da qualidade final dos painéis, como as espécies das árvores utilizadas, as características anatômicas, o teor de umidade e também, fatores relacionados aos processos produtivos do painel, como a densidade aparente, a razão de compactação, o tipo e teores de adesivo, a dimensão das partículas, a umidade das partículas, a temperatura de prensagem e a pressão específica (Moslemi, 1974; Maloney, 1993).

Segundo Nogueira *et al.* (2021), a escolha da madeira a ser utilizada na produção de painéis aglomerados deve levar em consideração não apenas a densidade, mas também outras características, como a estabilidade dimensional e a resistência mecânica.

Iwakiri (2005), Trianoski *et al.* (2015) e Araújo *et al.* (2019), defendem que a relação da densidade do painel sobre a densidade da madeira, ou seja, a razão de compactação, esteja no intervalo de 1,3 a 1,6, pois o aumento do fator de compactação pode gerar aumento das propriedades mecânicas e redução das propriedades físicas. Isto é, quanto mais densa a madeira, mais espessas serão as paredes celulares, o que dificulta a mobilidade do adesivo na estrutura lenhosa, proporcionando assim uma ligação mais superficial da madeira com o adesivo e, consequentemente, mais fraca.

Neste cenário, todas as propriedades dos painéis são afetadas pela razão de compactação, em maior ou menor grau. Uma razão de compactação muito baixa prejudica a colagem e a resistência do painel, afetando a absorção de água por

permitir maiores espaços para a sua penetração (Marton, 2014).

Deste modo, madeiras de menor densidade auxiliam na obtenção de uma boa razão de compactação enquanto as de maior densidade diminuem a razão de compactação. Os painéis com maior razão de compactação possuem maior quantidade de partículas de madeira e, conseqüentemente, maior densificação do painel, gerando a possibilidade de maior resistência mecânica (Araujo *et.al.*, 2019; Iwakiri; Trianoski, 2020).

3.8 Geometria das partículas

A geometria das partículas é um dos requisitos importantes na produção de painéis aglomerados, pois afeta diretamente as propriedades físicas e mecânicas do produto final. Devido a isso, diversos estudos têm sido realizados para compreender a relação e influência da geometria das partículas no desempenho dos painéis aglomerados.

Segundo Iwakiri (2005), o tamanho, a forma e a distribuição das partículas influenciam diretamente na densidade, na homogeneidade dos materiais e na adesão das partículas ao adesivo empregado durante a produção dos painéis. As partículas maiores podem contribuir para uma maior resistência mecânica, enquanto as partículas menores podem aumentar a densidade do painel.

Ainda de acordo com o mesmo autor, as partículas com maior superfície específica têm uma maior interação externa, resultando assim em uma maior demanda por resina (consumo relativo de resina ou disponibilidade de resina) para aglomeração das partículas por unidade de área de painel produzido. Logo, a redução ou eliminação dos “finos” contribui diretamente na redução do consumo de adesivo (Iwakiri, 2020).

Perante estudos de Miyamoto *et al.* (2002), Arabi *et al.* (2011) e Abdul Khalil *et al.* (2010), partículas geometricamente mais “cúbicas” favorecem a ligação interna entre os materiais, enquanto partículas mais alongadas beneficiam o desempenho mecânico (MOE e MOR) dos painéis.

3.9 Teor de umidade das partículas

A umidade das partículas é considerada uma variável importante na influência de desempenho dos painéis, pois, um alto teor de umidade ocasiona a redução de resistência mecânica e o aumento do tempo de prensagem, e conseqüentemente, o aumento do consumo energético no processo de produção. Em contrapartida, um teor de umidade abaixo dos valores mínimos acarreta uma adesão insatisfatória entre as partículas e o adesivo (Gong *et al.*, 2015; Chamma, 2004).

O teor de umidade das partículas depende diretamente do tipo de resina, tipo de madeira a ser selecionada, o tempo de prensagem e a espessura das partículas que serão utilizadas na produção dos painéis aglomerados. (Nascimento; Lahr; Christoforo, 2015).

Além disso, o teor de umidade é um fator relevante pois, quando ocorre a vaporização da umidade das camadas superficiais no processo de prensagem à quente, esse vapor migra para o interior do painel, fazendo com que a resina consiga fluir mais facilmente (Cazella, 2022).

De acordo com estudo de Baharoglu *et al.* (2012) sobre a influência do teor de **umidade das matérias-primas, níveis de umidade acima de 60% influenciava** negativamente o comportamento dos painéis e partículas com umidade abaixo de 20% causaram redução nos valores de propriedades físicas e mecânicas. Contudo, em estudos desenvolvidos por Silva *et al.*, foi evidenciado que partículas com umidade abaixo de 5% propiciam melhores propriedades físicas e mecânicas e para painéis aglomerados.

Em estudo, a madeira com umidade abaixo de 35% dificulta o controle da geometria das partículas devido a madeira produzir um maior volume de “finos”. Em compensação, o processamento da madeira em umidade saturada provoca o seu esmagamento, além de obstrução das facas e aumento do tempo de secagem do material (Iwakiri, 2005).

Segundo Iwakiri (2005), o teor de umidade também exerce influência na cura da resina e na pressão necessária para a produção do painel. Na indústria, as partículas, antes de serem secas, costumam apresentar umidade variando entre 35% a 120%, podendo alcançar teores finais de 3% a 6% (Nascimento; Lahr; Christoforo, 2015). Entretanto, partículas com alto teor de umidade final podem ser problemáticas, pois propiciam a formação de bolhas de vapor durante a prensagem dos painéis (Iwakiri, 2005).

Portanto evidencia-se de que a ausência do controle de umidade durante o

processo de produção do particulado, pode resultar em uma considerável variação do painel e alteração no seu desempenho final (FAO, 2022).

3.10 Pressão, tempo e temperatura de prensagem

De acordo com Iwakiri (2005), a principal função da pressão é a consolidação e a densificação do material até que o painel aglomerado atinja a espessura projetada. Em função da densificação do material, a variação da pressão varia entre as faixas de 12 a 40 kgf/cm² (1,18 a 3,92 MPa). Porém, o autor ressalta que é necessário manipular a pressão para que seja evitado o estouro dos painéis com a abertura da prensa.

Em conformidade com Trianoski (2020) e Iwakiri (2020), a temperatura para prensagem dos painéis possui a função de propiciar a polimerização e cura da resina e a “plasticização” da madeira, facilitando a compressão das partículas para consolidação do painel e, conseqüentemente, a definição da espessura final. Portanto a temperatura necessária varia diretamente de acordo com o tipo de adesivo utilizado e espessura projetada do painel.

Referente ao tempo de prensagem é definido necessariamente para que a resina cure e que a umidade migre e se libere na forma de vapor através das bordas do painel. O tempo de prensagem é definido variando de 6 a 12 segundos por milímetro de espessura dos painéis (Iwakiri, 2005).

3.11 Madeira Pinus sp

Englobando mais de 100 espécies, o gênero Pinus é uma árvore conífera que pertence a família das gimnospermas. De acordo com a Organização para a Alimentação e Agricultura (FAO, 2020), este gênero é uma das espécies de madeira mais cultivadas no mundo.

Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2020), o pinus é classificado como uma madeira exótica no Brasil, sendo encontrado em grandes áreas de reflorestamento. Seu cultivo é altamente difundido devido ao desenvolvimento de técnicas florestais e a excelente adaptação ao meio, fazendo do Brasil referência mundial no setor.

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2022), ressalta que a madeira é utilizada em diversos setores, principalmente pelas indústrias de madeira, de serrados e laminados, de chapas, de resina e de celulose e papel.

Amplamente empregada nas indústrias moveleiras e na construção civil, a madeira de Pinus é considerada um material de boa trabalhabilidade, fácil de desdobrar, aplinar, desenrolar, lixar, tornejar, furar, fixar, colar, permite bom acabamento e é de fácil secagem (IPT, 1989).

Na Tabela 2 é apresentando a massa específica e o módulo de elasticidade, conforme a ABNT NBR 7190 (1997), relacionada a *Projetos de Estruturas de Madeira*, de espécies de Pinus utilizadas no Brasil.

Tabela 2 – Propriedades físicas e mecânicas de espécies de Pinus

Nome comum	Nome científico	Massa específica aparente (umidade 12%) (kg/m³)	Módulo de elasticidade paralelo às fibras (MPa)
<i>Pinus caribea</i>	<i>Pinus caribea</i> <i>var. caribea</i>	579	8.431
<i>Pinus bahamensis</i>	<i>Pinus caribea</i> <i>var. bahamensis</i>	537	7.110
<i>Pinus hondurensis</i>	<i>Pinus caribea</i> <i>var. hondurensis</i>	535	9.868
<i>Pinus oocarpa</i>	<i>Pinus oocarpa shiede</i>	538	10.904
<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus elliottii</i> <i>var. elliottii</i>	560	11.889
<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus taeda</i> L.	645	13.304

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

O cultivo de *Pinus* sp no território brasileiro teve início há pouco mais de um século, com a introdução das primeiras espécies que demandavam condições ambientais específicas para se desenvolverem. Entretanto, os primeiros plantios não prosperaram devido à necessidade de clima com temperatura e chuva constantes. A partir da década de 1960, o reflorestamento recebeu incentivos fiscais, o que impulsionou o plantio de diversas espécies comerciais de *Pinus*, principalmente nas regiões Sul e Sudeste do país, destacando-se as espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. Desde então, a produção dessas espécies tem crescido e se desenvolvido de forma significativa no Brasil (EMBRAPA, 2014).

Com base nos dados da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 2020), a produção mundial de madeira de *Pinus* em 2020 foi cerca de 445,7 milhões de m³, o que representa cerca de 28,2% da produção mundial de madeira em geral. Referente aos maiores produtores de *Pinus*, estão os países dos Estados Unidos, Rússia, China, Brasil e Canadá, sendo os Estados Unidos líder da produção mundial, com mais de 30% da produção global em 2020 (FAO, 2020).

No Brasil, o plantio de pinus para fins comerciais cresceu consideravelmente nas últimas décadas. Segundo dados da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2021), a produção de madeira de pinus em 2021 foi de 35,1 milhões de m³, um aumento de 3,7% em relação ao ano anterior e a produção de madeira para a indústria de painéis, como o MDF, MDP e os OSB, também cresceu, alcançando 16,8 milhões de m³ em 2021.

Entre as espécies da madeira o *Pinus* sp é plantado para produção de madeira para processamento mecânico devido constituir alta quantidade de resina em sua composição. Considerada moderadamente dura e resistente, possui boas propriedades para usos em estruturas, construções civis, fabricação de chapas e madeira reconstituída. O processamento da madeira *Pinus oocarpa* gera cavacos como resíduos, maravalhas, cascas e serragem, representando entre 30% e 50% de seu volume total (EMBRAPA, 2016).

Ainda segundo EMBRAPA (2016), a utilização do *Pinus oocarpa* vem se intensificando nos últimos anos, devido à sua ampla disponibilidade, rápida taxa de crescimento e excelente potencial para uso em produtos florestais, como madeira serrada, laminada e painéis de madeira. Neste contexto, alguns estudos destacam suas propriedades de resistência mecânica e durabilidade, que são comparáveis às

de outras espécies de *Pinus* amplamente utilizadas na indústria madeireira.

De acordo com estudos o *Pinus oocarpa* apresenta bom desempenho em relação às propriedades físicas e mecânicas, sendo considerada uma alternativa promissora para a produção de painéis de madeira devido ao seu baixo custo, boa estabilidade dimensional e aplicabilidade em ambientes externos (Carneiro *et al.*, 2017; Galvão *et al.*, 2016; Figueiredo *et al.*, 2015).

Neste contexto a maioria das madeiras utilizadas como matéria-prima para produzir painéis aglomerados são oriundas de florestas plantadas, sendo a de *Pinus* a mais utilizada na produção dos painéis. No entanto, a crescente demanda do mercado por madeira, não segue o mesmo ritmo de sua oferta, sendo necessária a busca de matérias-primas alternativas, preferencialmente reutilizando algum tipo de resíduo (Cravo; Sartori; Fiorelli, 2017).

3.12 Resíduos madeireiros na fabricação dos painéis

De acordo com Iwakiri (2000) e Cerqueira (2012), as indústrias de base florestal no Brasil geram uma quantidade significativa de resíduos nos processamentos primário e secundário da madeira, desde a coleta da matéria-prima até a obtenção do produto final.

Segundo Feitosa (2008), apenas 35% de cada tora são transformados em produto serrado, os outros 65% são desperdiçados, transformando-se em resíduos não aproveitados pela indústria. O desperdício por tronco das indústrias de beneficiamento da madeira fica por volta de 60%. Empresas chegam a ter um desperdício de 80% por tronco, valor exacerbado, considerando-se as atuais preocupações ambientais e aproveitamento econômico (Carneiro, 2006).

As perdas no processo de desdobro e resserragem da madeira apresentam índices que variam de 20 a 40% do volume total das toras utilizadas no processamento industrial (Finotti, 2006).

De acordo com Fontes (1994) e o Instituto Brasileiro de Qualidade e Produtividade - IBQP (2002), os resíduos oriundos dos processamentos industriais da madeira são classificados em:

- i. Pó: resíduos menores que 0,5 mm, gerados no processo de corte e

lixamento da madeira;

- ii. Serragem: partículas com dimensões variando de 0,5 a 2,5 mm, oriundas do uso de serras, cortes e usinagem;
- iii. Maravalhas: partículas com dimensão superior a 2,5 mm, provenientes do processo de aplainamento;
- iv. Cavacos: partículas de dimensões máximas de 50x20 mm, geradas através de picadores e,
- v. Lenha: resíduo de grandes dimensões, aparas e resíduos de topo de tora.

De acordo com Cassilha (2004), os resíduos de madeira são utilizados na geração de energia, de biomassa para produção de MDF e aglomerado, como também na forração de granjas, currais e baias.

Segundo Mattos *et al.* (2008) e IBQP (2010), os resíduos empregados como matéria-prima para produção de aglomerados são provenientes principalmente dos seguintes setores: indústrias moveleiras, resíduos da exploração florestal, madeiras de baixa qualidade, madeiras não processadas de outras formas e reciclagem de madeira inapropriada.

Uma alternativa para utilização do resíduo madeireiro é a aplicação em brinquedos e a compostagem, sendo o primeiro necessário que se escolha as espécies corretamente para que os extrativos presentes na madeira não prejudiquem a saúde dos usuários (Gomes; Sampaio, 2004). Além de tais aplicabilidades, uma parte substancial de resíduos provenientes de processamento mecânico da madeira também é utilizada na geração de energia para fins industriais e domésticos (Iwakiri, 2000).

Embora a utilização dos resíduos florestais como fonte de energia proporcione benefícios sociais, essa prática concede baixo valor agregado ao produto final e emite gases prejudiciais ao meio ambiente na queima da madeira. Portanto, a produção de painéis de madeira aglomerada provenientes dos resíduos gerados de empresas moveleiras apresenta uma alternativa viável da matéria-prima.

Recentemente, houve um aumento significativo na realização de estudos voltados na utilização de resíduos madeireiros para a produção de painéis aglomerados, com variação das espécies de madeira, temperatura, teor de resina, dentre outros parâmetros, com o objetivo de melhorar as propriedades físicas e

mecânicas dos painéis fabricados. (Christoforo, 2015; Fiorelli, 2015; Nascimento, 2016; Iwakiri, 2017; Sam-Brew, 2017; Silva, 2018; Faria *et al.*, 2020).

3.13 Adesivos

De acordo com Iwakiri (2005) e Trianoski (2020), o adesivo é o principal componente que influência no custo do processo de produção de chapas de madeira aglomerada e, devido a isto, a quantidade a ser utilizada deve ser otimizada de acordo com as propriedades requeridas e incentivar a busca por alternativas para minimizar o custo final do compósito.

O adesivo é definido como um agente orgânico ou inorgânico utilizado para aglutinar partículas de madeira ou materiais de origem lignocelulósica na produção de um painel de partículas (ABNT, 2013; ASTM, 2016).

Segundo Iwakiri (2005), Nascimento, Lahr e Christoforo (2015) e Mano (2000), os adesivos utilizados na fabricação de painéis aglomerados são classificados como adesivos naturais, obtidos de fontes animais, vegetais e minerais (animal, caseína, albumina de proteína vegetal, mamona e tanino), como adesivos semissintéticos, derivados dos produtos naturais e submetidos a modificação química e, como os adesivos sintéticos, formados através de reações de poliadição e policondensação (ureia, resorcinol, fenol, melanina e polivinil).

Os parâmetros de dosagem do adesivo em um painel variam com o peso seco das partículas de madeira e com o conteúdo sólido resinoso, sendo de 5% a 10% e, destaca-se que, as partículas menores de madeira consomem mais adesivo devido à sua superfície específica, enquanto partículas maiores, consomem quantidade menor de adesivo (Iwakiri, 2005).

Segundo Maloney (1993), as propriedades físicas e mecânicas dos painéis aglomerados melhoram de maneira proporcional com o aumento da quantidade de adesivo, em especial a resistência à tração perpendicular (TP), porém, o custo de produção aumenta consideravelmente, tornando inviável essa prática.

Segundo Paes *et al.* (2011), Maloney (1993) e Pizzi (1994), os adesivos de origem sintética são atualmente os mais empregados na produção de chapas de madeira, em função das suas melhores propriedades de adesão e ao menor ataque de micro-organismos, quando comparados aos adesivos naturais. Diante disto, estão os adesivos à base de ureia-formaldeído, fenol-formaldeído e melamina formaldeído,

correspondendo a cerca de 90% dos adesivos utilizados para painéis à base de madeira produzidos pelo processo seco.

O adesivo à base de ureia-formaldeído, mais conhecido como UF, é classificado como um adesivo polimérico sintético termofixo que, quando submetida ao aquecimento, apresenta modificações químicas e físicas irreversíveis através das reações de policondensação, originando um material rígido e insolúvel (Silva, 2015).

De acordo Iwakiri e Trianoski (2020), o adesivo à base de ureia-formaldeído é considerado o adesivo mais utilizado na fabricação de painéis devido ao seu baixo custo em relação aos outros adesivos disponíveis no mercado e também, por ser considerado de fácil manuseio e oferecer uma cura rápida. Além disso, o adesivo à base de ureia-formaldeído é incolor, evitando assim cores indesejáveis aos painéis.

Todavia, a utilização da ureia-formaldeído (UF) é limitada em painéis aplicados apenas em ambientes internos devido à sua baixa resistência à umidade em suas propriedades (Marra, 1992). Contudo, quando misturada com melamina ou parafina, o painel adquire um aumento significativo na resistência à absorção de água (Iwakiri; Trianoski, 2020; Forest Products Laboratory, 1999).

No entanto, a ureia-formaldeído é classificada como agente de insalubridade máxima, devido ocorrer a liberação de gás formaldeído, considerado tóxico ao ser humano e ao meio ambiente, no processo de prensagem em altas temperaturas (Chipanski, 2006).

Perante este cenário, atualmente as pesquisas buscam desenvolver materiais biodegradáveis, atóxicos, não poluentes, com matéria-prima de fonte renovável e que não gere danos à saúde humana, tais como: poliuretano derivado de óleo de mamona, poliuretano de amido, entre outros (Azevedo, 2009; Fiorelli ., 2013).

Independentemente de qual a origem do adesivo, é importante ressaltar que sua função principal é unir partes de um conjunto, tendo o objetivo de suportar tensões de uma extremidade à outra, distribuindo de uma forma uniforme as tensões para que o produto final não necessite de fixadores mecânicos (Celestino, 2020).

3.14 Adesivo bicomponente poliuretano derivado de mamona (PUR)

A Poliuretano (PU) é um compósito polimérico constituído por dois ou mais materiais insolúveis, combinados entre si formando um material de engenharia útil que

possui propriedades não encontradas em seus constituintes (ASTM, 2019).

Os adesivos poliuretanos podem ser preparados de duas formas distintas. A primeira, chamada de *one-shot* (única etapa), produz um adesivo poliuretano monocomponente. Nessa abordagem, os três componentes principais do adesivo – poliol, diisocianato e extensores de cadeia – são combinados em uma única estrutura, formando um poliuretano bloqueado linearmente (Jesus, 2000).

Ainda de acordo com Jesus (2000), na segunda forma, conhecida como *two-steps* (duas etapas), tem como objetivo final obter um adesivo poliuretano bicomponente. Nesse caso, um pré-polímero é produzido inicialmente, no qual a polimerização está incompleta. Posteriormente, o pré-polímero é combinado a um poliol durante o processo de aplicação, resultando na formação do poliuretano. Essa abordagem permite um controle mais preciso das propriedades do adesivo, pois a reação de polimerização ocorre somente quando os dois componentes são misturados.

As resinas poliuretanos são comumente utilizadas para a confecção de chapas de madeira aglomerada, com as mesmas características das chapas produzidas com adesivos fenólicos, no entanto, apresentam vantagens de produzir painéis mais resistentes à umidade e não liberam formaldeído durante o processo de produção (DIAS, 2005).

Segundo Silva *et al.* (2013), é possível obter poliuretanos com diferentes níveis de rigidez, flexibilidade e desempenho através do tipo de poliol empregado na composição. Dentre eles, o surgimento do poliol derivado de óleo de mamona foi motivado pela proposta de utilização de produtos biodegradáveis, não poluentes e derivados de biomassa (Araujo, 1992).

O óleo de mamona, conhecido internacionalmente como *castor oil*, é extraído da semente da mamona *Ricinus communis*, planta da família das euforbiáceas, encontrada abundantemente em regiões tropicais e subtropicais (Fiorelli ., 2013; Marinho ., 2013).

O adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona foi desenvolvido no Instituto de Química de São Carlos – SP, da Universidade de São Paulo, Brasil (Araújo, 1992) e dentre suas vantagens, o óleo é derivado de uma matéria-prima natural e renovável, biodegradável, resistente à umidade, material não agressivo ao meio ambiente e ao ser humano em sua polimerização e, é oriundo de tecnologia brasileira (Dias, 2005).

Silva *et al.* (2021) realizaram um estudo comparativo entre três diferentes

resinas utilizadas na produção de painéis com resíduos de Pinus e Eucalipto. O estudo comparou duas resinas de poliuretano derivadas do óleo de mamona, fornecidas por diferentes empresas, com uma resina de ureia formaldeído. Os resultados evidenciaram que os painéis produzidos com as resinas de poliuretano derivadas da mamona (PUR) apresentaram maiores valores de MOR e menor inchamento em 24 horas em relação aos painéis produzidos com resina de ureia formaldeído (UF), independente da espécie de madeira.

No estudo realizado por Cazella (2022), avaliou-se a substituição parcial de partículas de Eucalipto por partículas de Politereftalato de Etileno (PET), aglutinadas com o adesivo PUR. Foram considerados painéis com densidade nominal de 0,7 g/cm³, pressão de 5 MPa, temperatura de 110 °C e 10 minutos de tempo de prensagem. Os resultados indicaram que as misturas com 50% de Pinus, 50% de PET e 10% de PUR apresentaram valores de 3,88% de inchamento em espessura, 28,79 MPa no módulo de resistência à flexão, 3.159,15 MPa no módulo de elasticidade na flexão e 2,49 MPa na tração perpendicular, superando os valores mínimos exigidos pelos documentos normativos ABNT NBR 14810-2 (2018) e ANSI A208.1 (2016).

Diferentemente do estudo de Cazella (2022), que utilizou uma temperatura de prensagem de 110 °C, o presente estudo propôs a utilização de uma temperatura mais elevada, de 160 °C, com o objetivo de avaliar os impactos dessa variável nos painéis de madeira propostos. Essa abordagem visa investigar como a elevação da temperatura de prensagem pode influenciar nas propriedades mecânicas e físicas dos painéis, proporcionando uma análise mais abrangente das condições de processamento ideais para a produção de painéis compósitos de madeira e PET.

Um estudo realizado por Oliveira . (2017) no qual substituíram parcialmente a madeira de eucalipto por couro (10%, 25% e 50%) provenientes da indústria calçadista, utilizando 10% de adesivo de poliuretano (PUR) como aglutinante. Os painéis foram produzidos considerando pressão de 7 MPa durante 10 minutos e, empregando temperatura de 100 °C. Os resultados apresentaram propriedades físicas e mecânicas satisfatórias do material, indicando o potencial da utilização do resíduo de couro e a resina poliuretano bicomponente na produção de painéis aglomerados de madeira com resíduo de couro.

Estudos desenvolvidos por Buzo . (2019) avaliaram painéis de Pinus e bagaço de cana empregando-se adesivos PUR e UF para aplicações na construção civil. Os painéis produzidos com 0% de adesivo PUR foram submetidos a uma temperatura de

100 °C e pressão de 5 MPa durante 10 minutos. Os resultados indicaram que os painéis apresentaram melhores propriedades físicas e mecânicas quando comparadas aos painéis produzidos com adesivo UF nas mesmas condições de produção, diferindo apenas na temperatura de prensagem (130 °C). Esse estudo destacou a vantagem do uso do adesivo PUR na produção de painéis, proporcionando melhores características ao material final.

Outro estudo realizado por Sugahara *et al.* (2018) comparou a utilização do poliuretano derivado do óleo de mamona com a ureia formaldeído para a produção de painéis aglomerados de eucalipto e bagaço de cana. Na produção dos painéis que envolveram o PUR, utilizaram 10% do adesivo e pressão de 5 MPa para prensagem durante 10 minutos à temperatura de 100 °C; os resultados para as propriedades físicas e mecânicas foram melhores em comparação aos painéis produzidos com o adesivo UF.

Com o objetivo de produzir materiais ecológicos e ecoeficientes, diversas literaturas (Cazella, 2022; Rodrigues, 2022; Souza *et al.*, 2022; Trevisan, 2021; Bispo, 2021; Gilio, 2020; Oliveira, 2019; Sugahara, 2018; Buzo, 2018; Minillo, 2017; Rocha, 2016) utilizaram o adesivo PUR na produção de painéis aglomerados, visando substituir as resinas convencionais por materiais alternativos e sustentáveis.

3.15 Polímeros Plásticos

Os polímeros plásticos são materiais sintéticos formados pela união de monômeros. Esses materiais possuem uma ampla variedade de aplicações devido às suas propriedades versáteis, como resistência, impermeabilidade, durabilidade, maleabilidade e baixo custo. Existem diferentes tipos de polímeros plásticos, como politereftalato de etileno (PET), polipropileno (PP), polietileno (PE) e policloreto de vinila (PVC), cada um com características e aplicabilidades específicas (Brydson, 1999; Ashby, 2013; Spinacé; Depaoli, 2005).

A produção de polímeros plásticos ocorre em diversas etapas, incluindo a utilização de matérias-primas distintas, como o petróleo e o gás natural, onde os polímeros são obtidos por meio de processos químicos através da formação de monômeros e a polimerização, formando-se assim, longas cadeias de polímeros. Esses processos industriais são responsáveis pela produção em larga escala de plásticos em todo o mundo (Gachter, 2017; Callister ., 2020)

De acordo com Callister *et al* (2020), os polímeros sintéticos podem ser classificados em termofixos e termoplásticos. Os termofixos são polímeros que se tornam permanentemente rígidos durante o processo de formação e não se liquefazem quando expostos à aquecimento, tornando-se mecanicamente não recicláveis. Uma vez moldados, os polímeros termofixos não podem ser fundidos e “remoldados”. Contudo, os termoplásticos são polímeros que amolecem quando aquecidos e resistem quando resfriados. Esse comportamento permite que ciclos repetidos de aquecimento e resfriamento sejam tolerados, tornando-os totalmente reversíveis em termos de processamento.

Segundo o Sindicato da Indústria de Material Plástico (SINDIPLAST, 2020), atualmente, os polímeros sintéticos amplamente utilizados no setor de embalagens são o Politereftalato de Etileno (PET), Polietileno (PE), Polipropileno(PP), Policroto de Vinila (PVC) e Poliestireno (PS). Tais polímeros são considerados *commodities* devido à sua grande produtividade e aplicabilidade e, também, fornecerem propriedades relevantes como resistência, leveza, flexibilidade, transparência e impermeabilidade. Tornando-os, assim, materiais adequados para diversas aplicações de embalagem, incluindo garrafas, filmes, sacolas, recipientes, entre outros.

No entanto, o ciclo de vida dos polímeros plásticos requer uma avaliação abrangente devido apresentar desafios ambientais e sociais associados às suas fases críticas em termos de consumo de recursos naturais, emissões de gases de efeito estufa e geração de resíduos no processo produtivo.

De acordo com Tcharkhtchi *et al.* (2019), o ciclo de vida dos polímeros se divide em cinco etapas:

- i. Início de vida e extração de matérias-primas: extração de recursos naturais como petróleo, gás natural ou carvão, resultando em impactos ambientais, como a degradação de habitats naturais e emissão de gases prejudiciais ao ar e a água;
- ii. Produção de substâncias químicas: síntese das substâncias extraídas das matérias-primas através de polimerização e processo químico, resultando no consumo de energia, geração de resíduos químicos e emissões de gases de efeito estufa;
- iii. Processamento e fabricação: submetidos à processos de moldagem, extrusão, injeção ou outros métodos de fabricação para geração de produtos finais,

como garrafas, embalagens, sacolas, entre outros e, também, resultando no consumo de energia, água e produtos químicos, geração de resíduos sólidos, bem como emissões de gases de efeito estufa;

iv. Uso e manutenção: consumo de energia durante a utilização do produto, liberação de substâncias químicas nocivas durante a destruição e geração de resíduos no uso de produtos plásticos descartáveis;

v. Descarte e fim de vida: após utilizados, os produtos são descartados de várias formas, através da reciclagem, incineração e descartes em aterros sanitários, resultando em diferentes impactos ambientais, como a geração de resíduos, emissões de gases tóxicos, contaminação do solo e da água.

De acordo com dados da organização ambientalista Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST, 2021), a produção global de plásticos consumiu 359 milhões de toneladas em 2020, e estima-se que 8 milhões de toneladas foram descartadas nos oceanos.

No Brasil, a produção e consumo de plásticos também são expressivos. Segundo o World Wide Fund for Nature (WWF, 2021), o país produziu cerca de 11,3 milhões de toneladas de plásticos em 2020, ocupando o 4º lugar de maior produtor de lixo plástico do mundo, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, China e Índia.

A Tabela 3 apresenta a produção e reciclagem de plástico dos principais consumidores entre os 200 países, destacando a relação produção e reciclagem de cada país.

Tabela 3 – Produção e reciclagem de plástico no mundo em toneladas

País	Total de lixo plástico gerado*	Total incinerado	Total reciclado	Relação produção e reciclagem
Estados Unidos	70.782.577	9.060.170	24.490.772	34,60%
China	54.740.659	11.988.226	12.000.331	21,92%
Índia	19.311.663	14.544	1.105.677	5,73%
Brasil	11.355.220	0	145.043	1,28%
Indonésia	9.885.081	0	362.070	3,66%
Rússia	8.948.132	0	320.088	3,58%
Alemanha	8.286.827	4.876.027	3.143.700	37,94%
Reino Unido	7.994.284	2.620.394	2.513.856	31,45%
Japão	7.146.514	6.642.428	405.834	5,68%
Canadá	6.696.763	207.354	1.423.139	21,25%

Fonte: WWF (2021).

Ainda de acordo com o levantamento realizado pelo WWF (2021) com base nos dados do Banco Mundial, os resultados revelaram que o Brasil possui uma média de produção de aproximadamente 1 quilo de lixo plástico por habitante a cada semana e do total de 11,3 milhões de toneladas produzidas, mais de 10,3 milhões foram coletadas, correspondendo a 91% do total. Entretanto, apenas 145 mil toneladas foram efetivamente recicladas, correspondendo a 1,28% do total produzido, ou seja, reprocessadas na cadeia de produção como produto secundário.

A conscientização sobre a necessidade de reduzir o uso de plásticos descartáveis e promover a reciclagem tem aumento globalmente. Governos, empresas e sociedade civil têm buscado soluções eficientes, como a implementação de legislações restritivas, políticas de gestão de resíduos, promoção da economia circular e o desenvolvimento de plásticos biodegradáveis e compostáveis (ATLAS DO PLÁSTICO, 2020).

3.16 PET (Politereftalato de Etileno)

Segundo a ABIPET (2018), o Politereftalato de Etileno (PET) é um polímero termoplástico sintético amplamente utilizado na indústria de embalagens, têxteis e fibras. Obtido por meio de reações químicas entre ácido tereftálico e o etilenoglicol, apresenta alta resistência mecânica e física em suas propriedades.

O PET foi descoberto em meados do século XX, onde, as primeiras embalagens surgiram nos Estados Unidos e, logo após na Europa, no início dos anos 1970. Desde então, a evolução tecnológica permitiu a construção de fábricas com alta capacidade de produção e a partir disso, seu consumo vêm crescendo rapidamente em todo o mundo.

No Brasil, a inclusão do PET surgiu na década de 1980, primeiramente na indústria têxtil como poliéster e, em 1993 passou a ter forte evolução mercadológica, notadamente para o setor de refrigerantes como embalagens de bebidas carbonatas, pois proporcionou eficiente barreira a gases, uma característica exclusiva entre os plásticos (ABIPET, 2018).

De acordo com Gandolf *et al.* (2020) e Mano (2000), o PET é um polímero linear, possui resistência ao impacto moderada, boa resistência química, baixo peso específico, baixa porosidade e permeabilidade, o que proporciona uma excelente barreira para gases e odores, sendo considerado o melhor e mais resistente plástico

para fabricação de garrafas e embalagens em geral.

De acordo com Ebewele (2000), Awaja e Pavel (2005) a Tabela 4 apresenta a descrição das propriedades físicas e mecânicas do Politereftalato de Etileno (PET):

Tabela 4 – Propriedades físicas e mecânicas do PET

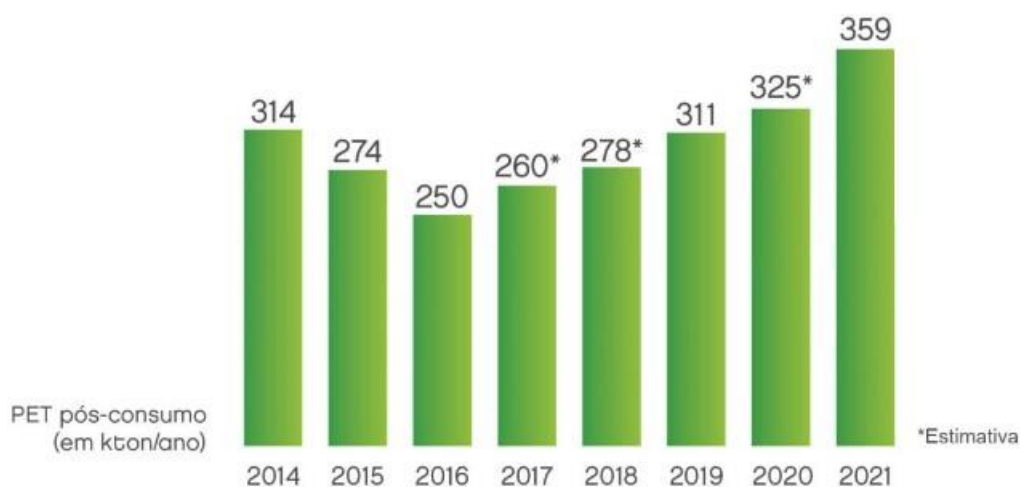
ME	TF	TTV	TS	RT	MT	RF	MF	AA24h
g/cm ³	Tm °C	Tg °C	°C	MPa	MPa	MPa	MPa	%
1,34		69	160	58,6	2758	96,5	2413	0,1
a	265	a	a	a	a	a	a	a
1,39		115	180	72,4	4136	124,1	3102	0,2

Fonte: Adaptado de Ebewele (2000); Awaja e Pavel (2005).

Notas: ME - Massa específica; TF - Temperatura de fusão; TTV - Temperatura de transição vítrea; TS - Temperatura de secagem; RT - Resistência a tração; MT - Módulo na tração; RF - Resistência a flexão; MF - Módulo na flexão; AA24h - Absorção de água após 24h

De acordo com levantamento anual realizado pela Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET, 2022) no 12º Censo da Reciclagem do PET no Brasil e de conforme ilustrado na Figura 6, 359 mil toneladas de embalagens PET pós-consumo receberam a destinação adequada, um crescimento de 15,4% sobre o volume registrado em 2019, último período em que o levantamento havia sido realizado. Naquele ano, 311 mil toneladas, ou 55% das embalagens PET descartadas foram recicladas.

Figura 6 – Pós-consumo de PET no Brasil

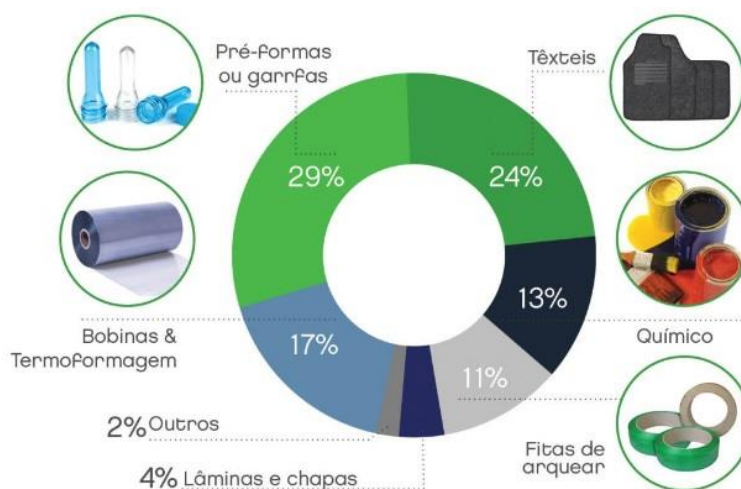


Fonte: Adaptado de ABIPET (2022)

Na Figura 7 verifica-se o principal consumidor da resina PET reciclada no ano

de 2021, registrado pelos fabricantes de pré-formas e garrafas, produtos que são utilizados principalmente pela indústria de água, refrigerantes, energéticos, entre outros, totalizando 24% de todo material reciclado. O setor têxtil ocupa o segundo lugar, com o consumo de 25%, bobinas e termoformagem com 17%, produtos químicos com 13%, fitas de arquear com 11%, lâminas e chapas com 4% e outras aplicabilidades com 2% (ABIPET, 2022).

Figura 7 – Destinação e consumidores do PET no Brasil



Fonte: Adaptado de ABIPET (2022).

Mesmo considerando as diversas aplicações viáveis para o PET reciclado, uma parcela significativa de 45% das embalagens não foi submetida ao processo de reciclagem e, possivelmente direcionadas a aterros sanitários regulares ou clandestinos, descartadas no ambiente marinho ou incineradas, desviando-se, assim, do destino adequado para esse tipo de material (ABIPET, 2020).

De acordo com Zoch (2013), apesar dos inúmeros benefícios e facilidades proporcionados pelo PET, os danos resultantes da busca por atender às demandas do mercado e a ausência de controle no seu descarte na natureza, contribuíram significativamente para um desastre ambiental de grande escala. Isso se deve ao fato de que, em sua composição natural, o PET é considerado um polímero não biodegradável, levando décadas, séculos ou até mesmo milênios para iniciar seu processo de decomposição.

Neste cenário, o processo de reciclagem e a utilização destes resíduos para a produção de novos materiais é uma alternativa para amenizar o impacto ambiental causado por esse polímero e agregar valor ao material reutilizado (Rodrigues e *tal.*,

2017; Fonseca *et al.*, 2014).

Segundo Stark *et al.* (2021), a utilização do Politereftalato de Etileno (PET) em compósitos de madeira-plástico, também conhecido como WPC (*Wood Plastic Composites*), tem sido objeto de estudo em diversos países nos últimos anos. Em compósitos com menor teor de termoplásticos, o PET não atua como uma matriz contínua, mas, desempenha um papel de ligante para a fibra lignocelulósica, semelhante aos aglutinantes em compósitos convencionais à base de madeira, como o MDP, o MDF e o OSB.

Com o objetivo de viabilizar a utilização de materiais alternativos eco eficientes e abundantes no mercado, diversas literaturas (CAZELLA, 2022; SILVA *et al.*, 2021; STARK *et al.*, 2021; HERNÁNDEZ *et al.*, 2020; ABREU *et al.*, 2018) utilizaram o PET na produção de painéis aglomerados, visando reduzir os resíduos e consequentemente, os impactos ambientais causados pelo material.

Segundo Silva *et al.* (2021) a utilização de PET reciclado tem possibilitado melhorar a qualidade das propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados, principalmente com relação à Resistência a Absorção e Inchamento, além de diminuir o impacto ambiental desse material quando descartado ao ar livre e em lixões.

3.16.1 Madeira plástica produzida com termoplásticos reciclados

Friedrich (2022) determina que a mistura de plásticos petroquímicos com biomassa é uma forma eficaz de tornar os produtos de construção ainda mais sustentáveis. Com isto, um dos principais representantes desses materiais de base biológica é o *Wood-Plastic Composite* (WPC), que incorpora até 90% de fibras de madeira em uma matriz termoplástica. E, ainda de acordo com o autor, as fibras de madeira são, em sua maioria, resíduos da indústria de serrarias, e os plásticos também podem ser provenientes de reciclagem.

Segundo Qiang *et al.* (2014), os compósitos plásticos de madeira originados de materiais lignocelulósicos e polímeros à base de petróleo têm atraído atenção generalizada devido ao baixo custo, baixo impacto ambiental e boa resistência às intempéries.

Morchid *et al.* (2023) define os compósitos madeira plástica por dois elementos principais: matriz e reforço. No primeiro caso, os compósitos são predominantemente constituídos de material termoplástico, resultando em um componente com matriz

contínua e o elemento de madeira serve como reforço ou enchimento. O teor de madeira é tipicamente inferior à 60% em massa. No segundo caso, os compósitos são constituídos com baixo conteúdo termoplástico, com componente não contínuo, atuando mais como aglutinante das fibras, do mesmo modo que os adesivos em painéis à base de madeira. Neste contexto, o teor de termoplástico geralmente é inferior à 30% em massa.

Em relação ao processo de fabricação, os compósitos de madeira plástica podem ser produzidos de diversas formas, sendo por meio de extrusão, injeção ou compressão plana em alta temperatura. Diferentemente dos painéis aglomerados de partículas, os compósitos madeira plástica não utilizam adesivo em suas composições, entretanto, podem ser utilizados agentes de acoplamento para melhorar a adesão do termoplástico às partículas lignocelulósicas (Stark *et al.*, 2021).

A reutilização de termoplásticos na produção de compósitos por meio de prensagem plana com calor ou extrusão, envolvendo resíduos lignocelulósicos da agroindústria ou serragem proveniente do processamento de madeiras das indústrias, tem sido objeto de pesquisa em nível global. Buscando aprimorar as propriedades dos compósitos e promover a sustentabilidade do setor, diversos pesquisadores têm se dedicado a essa área de estudo, como, utilizando termoplásticos reciclados combinados com sabugo de milho (Junxiong *et al.*, 2023), termoplásticos combinados com fibra de coco (Dharmaratne *et al.*, 2021), termoplásticos com proporções de serragem sem a utilização de adesivos (Chotikhun *et al.*, 2022; Lopez *et al.*, 2020; Allaf, 2020; Lopez *et al.*, 2018).

Segundo estudo realizado por Rahman *et al.* (2013), foram produzidos e avaliados compósitos de madeira-plástico (CMP) utilizando pó de serra e polietileno tereftalato (PET) reciclados em proporções 40/60, 50/50, 60/40 e 70/30, sem o acréscimo de adesivos aglutinantes. A metodologia considerada foi a partir da compressão plana com aquecimento à temperatura de 190 °C, valor de prensagem de 5 MPa, com duração total de 25 minutos, sendo assim, considerado processo semelhante ao da produção de painéis aglomerados. Neste estudo foram analisados as propriedades físicas e mecânicas, como densidade, absorção de água, inchamento em espessura, módulo de elasticidade (MOE) e resistência à flexão (MOR).

Constataram que a partir do aumento da proporção de PET, resultou na redução de 15,7% na absorção de água em 24h e 4,3% no inchamento em espessura dos compósitos, com efeito comparativo perante proporções de pó de serra/PET de

70/30 e 40/60, respectivamente. Além disso, as propriedades de MOE e MOR foram significativamente majoradas com a redução do pó de serra e o aumento da proporção de PET nas misturas, partindo de 1433,93 MPa (70/30) para 2008,34 MPa (40/60) e de 11,68 MPa (70/30) para 27,08 MPa (40/60), respectivamente.

Em outro estudo analisado por Rahman . (2018), produziram compósitos madeira plástica utilizando diferentes proporções de partículas de madeira (*Albizia richardiana* King & Prain) e PET como 40/60, 50/50, 60/40 e 70/30 e, também, diferentes dimensões das partículas de madeira, de 0,5 a 1,0 mm e 1,1 a 2,0 mm, em junção com partículas de PET inferiores a 0,25 mm. Avaliaram e compararam os efeitos de cada variável considerada através dos resultados obtidos das propriedades físicas, mecânicas e de decomposição, sem a utilização de agente de acoplamento.

Em relação à metodologia, foi considerado método de compressão plana com aquecimento à temperatura de 190 °C, com duração de 5 minutos e, posteriormente, prensagem à frio com duração total de 6 minutos, ambos processos com aplicação do valor de prensagem de 5 MPa.

Os resultados obtidos revelaram uma relação direta entre o aumento das proporções de PET nas misturas e o aumento da densidade dos compósitos. Além disto, constatou-se que as misturas contendo partículas de madeira no intervalo de 0,5 a 1,0 mm apresentaram valores de densidade superiores em comparação com os tratamentos contendo partículas de 1,1 a 2,0 mm, contudo, com relação as propriedades de Resistência ao Inchamento e Absorção após 24h, os painéis com partículas entre 1,1 e 2,0 mm, foram inferiores com relação aos painéis produzidos com misturas de 40/60 e partículas de 0,5 a 1,0 mm.

Referente às propriedades físicas de absorção e inchamento após 24h dos painéis, foi constatado que os que continham partículas de madeira no intervalo de 1,1 a 2,0 mm foram inferiores em comparação com os painéis compostos por partículas de 0,5 a 1,0 mm. A proporção de madeira/PET de 40/60 apresentaram os menores valores de absorção e inchamento dos painéis produzidos.

Quanto às propriedades mecânicas, Rahman *et al.* (2018) observaram maiores valores de MOR e MOE para os painéis envolvendo as partículas de 1,1 a 2,0 mm de madeira, sendo para MOR a mistura 40/60 a de maior resultado (acima de 30 MPa) e para MOE a mistura com proporção 50/50 (2570 MPa) a de maior resultado.

Por conseguinte, os autores ressaltaram que o tamanho das partículas de madeira exerce influência direta nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos

de madeira plástica. Além disso, evidenciam que a proporção de 50/50 entre as partículas de madeira e PET foi considerada a mais promissora e tecnicamente viável para a fabricação de tais compósitos.

3.16.2 Painéis aglomerados com PET reciclado

Estudos têm se intensificando em trabalhos voltados para a busca de melhorias nas propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados através da utilização de resíduos provenientes de materiais não renováveis e poluentes ao meio ambiente e ao ser humano.

Perante este cenário e de acordo com os diversos estudos, o PET tem sido considerado um material promissor na substituição parcial da madeira em painéis aglomerados, devido possuir diversas vantagens em suas propriedades, como proporcionar a redução de absorção de água e também aumentar a resistência mecânica dos painéis (Cazella, 2022; Lopez *et al.*, 2020; Klímek *et al.*, 2016).

Cazella (2022) produziu painéis aglomerados a partir da utilização de partículas da madeira *Pinus elliottii* misturadas com partículas de PET na proporção 70/30, 50/50 respectivamente e aglutinadas com adesivo bicomponente poliuretano derivado do óleo de mamona (PUR) nas proporções de 5 e 10%; foram produzidos painéis de referência utilizando 100% pinus com 10% PUR. As partículas de madeira foram secas até atingirem 3% de umidade e foi considerado densidade nominal de 0,7 g/cm³, pressão de 5 MPa, temperatura de 110 °C e 10 minutos de tempo de prensagem para fabricação dos painéis. Foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas utilizando-se a ABNT NBR 14810-2 (2018) e ANSI A208.1 (2016).

Verificou-se que os painéis produzidos com 50% pinus, 50% PET e 10% de PUR apresentaram 65,64% de aumento na resistência à elasticidade (MOE) em comparação com os painéis sem adição de PET, resultando em valores médios de 3159 MPa e 1908 MPa, respectivamente e ainda para os mesmos painéis, foram determinados os maiores resultados de resistência à flexão (MOR) e tração perpendicular (TP) em comparação com os demais painéis, resultando em valores médio de 28,79 MPa e 2,49 MPa, respectivamente.

Em relação às propriedades físicas, verificou-se que a absorção após 24h reduziu em função do aumento na substituição de madeira Pinus por PET, verificou-se um inchamento de 3,88% em espessura e com o auxílio da Microscopia Eletrônica

de Varredura (MEV), evidenciou-se que as composições constituídas de 30% e 50% de PET e com 10% de adesivo PUR, obtiveram melhor “envelopamento” das partículas e maior preenchimento de vazios, se comparados aos painéis da sem adição de PET e dos painéis com 5% de PUR.

Verifica-se de modo geral, que a utilização do PET com adesivo PUR em painéis aglomerados propicia melhorias tanto nas propriedades físicas quanto mecânicas dos painéis aglomerados e, além disto, possibilita contribuição ambiental e econômica.

Os estudos de Ariantie Rafani (2021), avaliaram o desempenho físico e mecânico de painéis aglomerados de serragem e partículas de PET derivado de garrafas, nas proporções 50/50, 60/40 e 70/30 (serragem/PET), com a utilização de 11% de resina ureia formaldeído (UF). Em relação a metodologia, foi utilizada pressão de 2,5 MPa, temperatura de prensagem 200 °C e tempo de prensagem 20 minutos. Constataram que, os resultados de densidade dos painéis aumentaram de acordo com o aumento da substituição de PET por serragem, variando de 0,757 g/cm³ para 0,828 g/cm³, nas proporções 50/50 e 70/30, respectivamente. No que se refere à absorção de água, os resultados variaram de 62,15%, na proporção 70/30 e 27,58% na proporção 50/50, evidenciando assim, uma redução significativa na absorção de água.

Ainda de acordo com Ariantie Rafani (2021) houve aumento do inchamento em espessura, com o aumento da substituição de serragem por PET, sendo 9,84% para a proporção de 70/30 e 14,92% para 50/50.

Quanto às resistências mecânicas, foi identificado redução conforme o aumento das partículas de PET, sendo os valores de MOE 862,09 MPa para 70/30 e 383,42 MPa para 50/50, os valores de MOR 4,16 MPa para 70/30 e 1,77 MPa para a proporção 50/50 e os resultados de TP 1,85 MPa para a proporção 70/30 e 0,53 MPa para 50/50.

De acordo com os resultados obtidos, os autores concluíram que as partículas de PET não derreteram durante o processo de prensagem à quente, não ocasionando o “envelopamento” das partículas, e o a presença de vazios em toda a estrutura dos painéis, influenciando assim, nos resultados negativos das propriedades físicas e mecânicas. Portanto, evidenciaram a necessidade de aumentar o tempo e a temperatura de prensagem adotadas em estudo, a fim de alcançar resultados mais promissores.

Segundo estudos realizados por Ferreira e Knuth (2019), foram produzidos e avaliados painéis aglomerados utilizando madeira teca (*Tectonagrandis*), adesivo UF (12%) e adição de PET em proporções de 5, 10 e 15% em dois tamanhos diferentes de partículas (*flakes* com 0,2 x 5,0 x 8,0 mm e partículas menores que 2mm), prensados à 160°C, com pressão 4 MPa durante 3 minutos. Foi verificado que houve aumento da densificação do painel com o acréscimo de 15% das partículas menores que 2 mm de PET, atingindo valores de 0,63g/cm³.

Ainda de acordo com Ferreira e Knuth (2019) para absorção após 24h não foi verificado variação significativa nos valores médios com o acréscimo de 5, 10 e 15% das partículas menores que 2 mm de PET e para o inchamento 24h em espessura foi observado um aumento dos valores médios de 9,28 % (0 % PET) para 10,68 % (15 % PET) em relação à utilização das partículas menores que 2 mm. Com relação aos valores obtidos de ligação interna foi verificado os maiores resultados com o acréscimo de 5% de PET em partículas menores que 2mm, atingindo o valor médio de 0,67 MPa.

Dotun, Adesoji e Oluwatimilehin (2018) avaliaram painéis compostos de pó de serra e PET reciclado de garrafas, com substituições de 10, 20, 30, 40 e 50 % de pó de serra por PET, utilizando 20% de UF em relação ao volume dos painéis. Os painéis foram constituídos a partir da mistura de pó de serra e PET e aplicado ciclo de prensagem trifásico, que consistiu em pré-prensagem em um macaco hidráulico para reduzir a altura do colchão de partículas, posteriormente direcionado ao forno e mantido durante 1h à temperatura de 80 °C. Por fim, os painéis foram prensados à frio com o objetivo de aumentar a fixação da resina às partículas. Subsequentemente, o molde foi exposto e descansado em temperatura ambiente durante período total de 24 h e, após isto, exposto ao aquecimento de 110 °C durante 3 horas no forno.

Tais autores evidenciaram que a densidade dos painéis aumentou de acordo com o aumento na substituição de pó de serra por PET, sendo 0,537 g/cm³ para a proporção 70% pó de serra + 30 % PET e 0,710 g/cm³ para 50 % pó de serra + 50 % PET.

Referente aos resultados das propriedades físicas, revelaram menores valores de absorção e inchamento quando houve a redução de pó de serra e aumento na quantidade de PET nas misturas. Ressaltaram que a natureza hidrofílica da madeira, que consiste em celulose, lignina e hemicelulose, reage diretamente com moléculas de água e, de acordo com a redução da quantidade de madeira, reduziu-se a interação

da água com o painel.

Quanto aos resultados das propriedades mecânicas, observaram aumento considerável de MOR e MOE a partir de 30% de substituição de pó de serra por PET, sendo os painéis com 50% de substituição os de maiores valores, com MOR 9,04 MPa e MOE 964,99 MPa.

Portanto a partir das propostas realizadas em estudo, os autores concluíram que a mistura 50% pó de serra + 50% PET obteve os melhores resultados, sendo considerada a de melhor interação entre as partículas de PET, adesivo UF e pó de serra.

Santos . (2011), produziram painéis aglomerados a partir da utilização do resíduo da madeira de candeia (*Eremanthus erythropappus*) e partículas de PET. Analisaram a influência das diferentes percentagens de polímero PET e também da presença e ausência de parafina sobre as propriedades dos painéis aglomerados. Consideraram resíduos da madeira de candeia em associação à madeira de eucalipto, na proporção de 25/75, respectivamente, adesivo UF (12%) e também a incorporação de PET na forma de partículas originadas de envases de refrigerantes em três percentagens de incorporação (0; 25 e 50%) em tratamentos na ausência e na presença de emulsão de parafina (1%). Em relação a metodologia utilizada, o ciclo de prensagem dos painéis ocorreu sob aquecimento elétrico à temperatura de 160°C, pressão de 4MPa, com duração total de 8 minutos.

Nos painéis produzidos sem a utilização de parafina foi observado melhoria nos resultados de MOR de 8,05 MPa sem PET para 8,33 MPa com 50% de PET e redução nos valores médios de MOE de 791,78 MPa sem PET para 432,56 MPa com 50 % de PET e redução nos valores médios de ligação interna de 0,84 MPa sem PET para 0,42 MPa com 50% de PET. Em relação às propriedades físicas, foi evidenciado que a incorporação do PET reduziu a absorção de água após 24h de 72,87 % sem PET para 56,54 % com 50 % de PET e também, o inchamento em espessura 24 h de 18,60 % sem PET para 15,67% com 50% PET.

Considerando tais resultados, os autores concluíram que não há necessidade da utilização de parafina nos painéis que foram produzidos com a incorporação de PET, pois, a parafina não proporcionou efeitos significativos na absorção de água e inchamento nos painéis produzidos com PET. Entretanto, ressaltaram que a redução das propriedades mecânicas foi decorrente da ausência de ligação entre o PET e o adesivo.

Dentre os estudos relacionados à utilização de partículas de PET em painéis aglomerados de madeira, não houve relatos de pesquisas que abordaram a combinação de proporções de partículas de resíduos de Pinus, oriundo de indústrias moveleiras, combinados com partículas de PET reciclado, proveniente de garrafas, aglutinadas com adesivo renovável e sustentável constituído de poliuretano bicomponente derivado do óleo de mamona (PUR).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Madeira de *Pinus sp*

A maravalha para produção dos painéis aglomerados será da espécie *Pinus sp* a ser fornecida pela empresa KELAN Indústria e Comércio de Móveis Ltda, localizada no Município de Penápolis, SP, Brasil. A referida indústria em seu processo de produção de móveis gera um significativo volume de resíduos decorrente do torneamento de caibros nas dimensões de 250x40x40 cm provenientes do Paraná, Fazenda Rio Grande, especializada no fornecimento de madeira de reflorestamento para indústrias moveleiras em todo o Brasil.

Para processo de preparação das peças que comporão o mobiliário, os caibros são torneados em um torno copiador de madeira modelo TCA 500 LAMPE, conforme ilustra a figura 8, esse processo gera por volta de 47% do total da massa do caibro, originando o resíduo que será utilizado para produção dos painéis aglomerados. A Figura 8 ilustra o detalhamento do processo de usinagem onde é gerado os resíduos de maravalha.

Figura 8 – Geração de resíduo moveleiro no processo de usinagem



(a) Caibro fixado no dispositivo



(b) Torneamento da peça e geração de maravalha.



(c) Finalização da peça.

Fonte: Herradon (2023)

De acordo com a demanda de mercado e processo de produção e usinagem, atualmente a indústria moveleira KELAN gera cerca de 1 tonelada por dia de resíduos de maravalha, sendo destinados apenas para compostagem. A Figura 9 apresenta os “bags” com resíduo gerado diariamente pela KELAN a serem destinados para

compostagem.

Figura 9 – Volume de resíduo gerado diariamente por indústria moveleira



Fonte: Herradon (2023)

Analisando este cenário e conforme descrito, atualmente é possível dispor de um volume significativo de resíduos industriais para produção de painéis, a Figura 10 ilustra os aspectos gerais do resíduo gerado pela indústria moveleira KELAN para produção de painéis aglomerados que serão submetidos a avaliações considerando a utilização de adesivos alternativos.

Figura 10 – Partículas de Pinus sp descartadas por indústria moveleira



Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Adesivo poliuretano bicomponente derivado de mamona (PUR)

O adesivo PUR AGT1315 a ser utilizado para produção de painéis será fornecido e doado pela empresa IMPERVEG® Polímeros Indústria e Comércio Ltda, com sede em Aguaí, São Paulo, Brasil.

De acordo com a IMPERVEG e literaturas citadas (Trevisan, 2021; Gilio, 2020; Buzo, 2018), utilizou-se a proporção 1:1 de poliol em relação ao pré-polímero, sendo o poliol um líquido viscoso de coloração clara e oriundo do óleo de rícino e o pré-polímero constituído por metileno difenil diisocianato (MDI), oriundo do petróleo e apresenta coloração escura.

Em relação às suas propriedades, o adesivo PUR é isento de solventes, não libera tóxicos ao meio ambiente e ao ser humano, possui resistência ao calor até 210 °C, tempo de secagem de 60 a 90 minutos, tempo de cura inicial de 24 horas e final, em até 7 dias (IMPERVEG, 2022).

4.1.3 Politereftalato de Etileno (PET)

O PET a ser utilizado neste estudo será proveniente da empresa Global PET SA, localizada na cidade de São Carlos, São Paulo, Brasil em forma de pó que é oriundo de garrafas de bebidas descartadas.

A empresa Global PET processa garrafas de bebida descartadas e comercializa as partículas de PET em forma de pó.

4.2 Métodos

Os estudos serão desenvolvidos para um período de 6 meses considerando-se a utilização de adesivos alternativos.

4.2.1 Definição das propostas de misturas

Conforme apresentado na Tabela 5, são propostas misturas com os materiais em diferentes proporções para produção dos painéis aglomerados. Foram produzidos painéis empregando-se PUR associado a pó de PET e para cada mistura foram realizados 3 painéis, totalizando 15 painéis.

Tabela 5 – Propostas de misturas para produção dos painéis aglomerados

Misturas	Pinus sp	PET	PUR
	(%)	(%)	(%)
Mistura 1	75	15	10
Mistura 2	50	40	10
Mistura 3	65	30	5
Mistura 4	40	55	5
Mistura 5	50	50	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Pinus sp - Partículas de Pinus sp; PPET – Pó de Politereftalato de Etileno; PUR - Adesivo poliuretano bicomponente derivado de mamona.

Estudos desenvolvidos por Ferreira e Knuth (2019) evidenciaram que as proporções de 5, 10 e 15% de PET não exercem mudanças significativas nos painéis produzidos com teca, aglutinados com 12% de UF. Nesta pesquisa considerou substituições de madeira por Pó de PET (PET) nas proporções de 10%, 5% e 0% de PUR, para verificar a interação entre a madeira e o ligante.

Já em relação a definição dos teores dos ligantes desta pesquisa, foi considerado os estudos realizados por Iwakiri (2020) e Trianoski (2020), que os adesivos com maior custo devem ser utilizados nas proporções de 5 a 10% com relação a massa seca das partículas de madeira.

De acordo com estudos feitos por Gilio (2020), que produziu painéis com partículas de teca e seringueira aglutinados com 5 e 10% de PUR, foram evidenciados melhores propriedades físicas e mecânicas na utilização de 10% do adesivo, bem como os painéis produzidos com 5% de PUR também alcançaram classificação conforme os requisitos mínimos da ABNT NBR 14810-2 (2018). Portanto, a presente pesquisa definiu a utilização de 10% e 5% para os adesivos que apresentam custo significativo, propiciando assim economia para a produção dos painéis.

Os painéis foram produzidos à temperatura de 160 °C, pressão de 5 MPa e tempo de prensagem de 10min, em dois tempos de 5 min com intervalo de 30 segundos para evitar o acúmulo de gases no interior dos painéis. Todos os parâmetros foram embasados de acordo com literaturas (Iwakiri, 2020; Cazella, 2022; Gilio, 2020, Souza, 2022).

É importante destacar de que as propostas foram definidas com prensagem à

temperatura de 160 °C considerando a temperatura de secagem do PET, equivalente a 160 °C, conforme indicado na Tabela 4 sobre as propriedades físicas e mecânicas do Politereftalato de Etileno (PET).

4.2.2 Preparação dos resíduos

Conforme mencionado no item 4.2.1, o resíduo moveleiro, ilustrado anteriormente na Figura 10, foi coletado diretamente do processo de usinagem da indústria moveleira para produção dos móveis. Sendo assim, houve necessidade de peneiramento e consequente classificação granulométrica para definição das dimensões que compõem os painéis.

O processo de separação das partículas se deu utilizando-se inicialmente um agitador elétrico de peneiras, conforme ilustrado na figura 11. De acordo com (Iwakiri, 2020; Cazella, 2022; Gilio, 2020, Souza, 2022) o resíduo coletado para ser empregado na produção de painéis deve ser peneirado e separado na faixa de 2 a 6 mm, essa faixa granulométrica possibilita a definição dos melhores parâmetros para produção dos painéis e, consequentemente, melhores propriedades físicas e mecânicas, bem como melhor eficiência do adesivo.

A Figura 11 ilustra o equipamento utilizado para a separação inicial das partículas, que se constitui de um agitador elétrico de peneiras.

Figura 11 - Agitador elétrico de peneiras



Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Classificação granulométrica das partículas

Conforme estudos de Bispo (2021) e Trevisan (2021), para classificação das partículas foram realizados ensaios adaptados para determinação da composição granulométrica com base na NBR NM 248 (ABNT, 2022) que é utilizada 500g de agregados para materiais “cimentícios”, contudo, para os ensaios com partículas de madeira, utilizou-se de 30 a 50g de massa de partículas de madeira, que segundo os autores referenciados é uma massa adequada para realização do ensaio.

A referida norma brasileira propõe o peneiramento das partículas por meio do agitador elétrico de peneiras (Figura 11).

4.2.4 Ensaio para determinação da composição granulométrica das propostas de madeira.

Segundo as definições da norma ABNT NBR NM 248 (2022), a massa de uma amostra deve ser de 300 a 500 g e é necessário que o material tenha dimensões

menores e/ou iguais as malhas das peneiras, para que seja possível a passagem e retenção do material em todas as peneiras que compõem o ensaio. Porém, como as partículas de madeira possuem massa específica menores, dimensões e volumes diferentes quando comparadas aos agregados utilizados no concreto, foram realizadas adaptações, com base nos estudos desenvolvidos por Bispo (2021), Trevisan (2021), que utilizaram de 30 a 50 g de partículas em seus trabalhos.

Conforme ilustrado na Figura 12, o ensaio foi realizado utilizando-se o conjunto de peneiras em ordem de crescente de abertura das malhas, sendo, 1/4"; nº4; nº8; nº16; nº30 e nº50 com aberturas respectivamente de 6,30; 4,76; 2,38; 1,19; 0,595 e 0,297 mm.

Figura 12 – Conjunto de peneiras para determinação da composição granulométrica



Fonte: Autoria própria.

O ensaio para determinação da composição granulométrica foi realizado em amostra de partículas de *Pinus sp* e amostra de PET, para produção dos 15 painéis.

De acordo com Trevisan (2021) e Gilio (2020), o tempo total de peneiramento deve ser de 15 minutos, com frequência do agitador de peneiras no nível 4; após

peneiramento, o material retido em cada peneira foi pesado, registrando-se a massa para cálculo da composição granulométrica; com a obtenção dos resultados dos ensaios realizados nas 2 amostras dos materiais, calculou-se a média das massas retidas e acumuladas, como também o módulo de finura, a fim de verificar se as dimensões das partículas estarão de acordo com os parâmetros estabelecidos para a produção dos painéis, que deve ser com partículas entre 2 a 6mm.

4.2.5 Umidade das partículas

Conforme descrito por Nascimento, Lahr e Christoforo (2015) e Iwakiri (2005), as condições de umidade das partículas possuem papel primordial no desempenho final dos painéis aglomerados.

Nos estudos de Borysiuk *et al.* (2020), Klímek *et al.* (2016) e Iwakiri (2005), foi constatado que o teor de umidade das partículas no intervalo de 3 a 5% proporcionam maior interação dos materiais ao adesivo empregado, conseqüentemente, afim de eliminar o excesso de umidade, as partículas são expostas ao sol até atingirem o mínimo possível de umidade e caso não atinja o limite recomendado, o material é levado para concluir a secagem em estufa em temperatura normatizada de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Para verificação do teor de umidade nas partículas é realizada utilizando-se a balança térmica ilustrada na Figura 13, que é uma balança térmica com Infravermelho configurada com temperatura de 103°C e tempo de 2 minutos.

Para verificação do teor de umidade nas partículas utiliza-se uma balança térmica, conforme ilustrada na Figura 13. A referida balança possibilita a determinação da umidade das partículas por meio de luz Infravermelho configurada com temperatura de 103°C e tempo de 2 minutos.

Figura 13 – Balança térmica para determinação do teor de umidade das partículas



Fonte: Autoria própria.

4.2.6 Produção dos painéis aglomerados

A homogeneização dos adesivos às partículas foi realizada de acordo com metodologia empregada nos trabalhos de Souza (2022), Cazella (2022), Trevisan (2021), Bispo (2021) e Gilio (2020), ou seja, devido o PUR ser um adesivo bicomponente, adicionou-se manualmente às partículas de madeira o polioli e em seguida a mistura foi transferida para um tambor giratório e homogeneizado por 5 min. Esse mesmo procedimento foi realizado com a adição do pré-polímero. Segundo os autores, esse procedimento melhora a homogeneização do PUR às partículas de madeira, propiciando cura mais estável e melhorando a qualidade dos painéis.

Após a homogeneização do adesivo às partículas é realizado de acordo com metodologia empregada nos trabalhos de Souza (2022), Cazella (2022), Trevisan (2021), Bispo (2021) e Gilio (2020), ou seja, no caso dos adesivos bicomponente adiciona-se às partículas separadamente as duas partes, inicialmente a resina junto as partículas e posteriormente o catalizador. Desta forma inicialmente a resina foi homogeneizada manualmente às partículas e em seguida a homogeneização seguiu por período de 5 minutos com auxílio de um tambor giratório (betoneira).

Posteriormente a utilização da betoneira o catalisador foi adicionado a mistura, homogeneizado manualmente às partículas e em seguida por 5 min com auxílio de tambor giratório (betoneira). Esse procedimento, segundo os autores referenciados, possibilita melhor homogeneização do adesivo às partículas de madeira, melhorando a qualidade dos painéis.

Após a homogeneização do adesivo às partículas, é realizado a preparação do colchão de partículas utilizando-se uma formadora de colchão com o objetivo de propiciar ao material “encolado” um formato inicial para compactação dos painéis. A Figura 14 ilustra as etapas para produção dois painéis de partículas.

Figura 14 – Ilustração das etapas para produção dos painéis



(a)
Preparação do colchão de partículas



(b)
Colchão de partículas pronto para prensagem na prensa aquecida.



(c)
Painél de partículas após prensagem

Fonte: Herradon (2023).

Antes de iniciar o processo de prensagem, as chapas da prensa são aquecidas até atingir a temperatura desejada de 160 °C. Em seguida, os painéis de partículas são produzidos sob uma pressão de 5 MPa, aplicada durante um intervalo de 10 minutos. Esse intervalo é dividido em duas etapas: nos cinco minutos iniciais, é realizado um alívio de pressão de 30 segundos para liberar gases acumulados no interior do painel; nos cinco minutos finais, a pressão é mantida constante para completar a prensagem, permitindo a ativação do adesivo proposto nesta pesquisa e garantindo a consolidação adequada do painel.

Os parâmetros para produção dos painéis são propostos para propiciar melhor movimentação do adesivo no interior dos painéis e, conseqüentemente, “envelopamento” do adesivo às partículas.

Após procedimento de prensagem, os painéis são estabilizados em local coberto à temperatura ambiente durante 7 dias objetivando finalização da cura dos

adesivos utilizados.

Decorridos no mínimo 7 dias da compactação dos painéis, serão realizados os ensaios físicos e mecânicos, que inicia com a preparação dos corpos de prova. Para cada ensaio físico e mecânico serão utilizados 10 cps.

4.2.7 Ensaios físicos

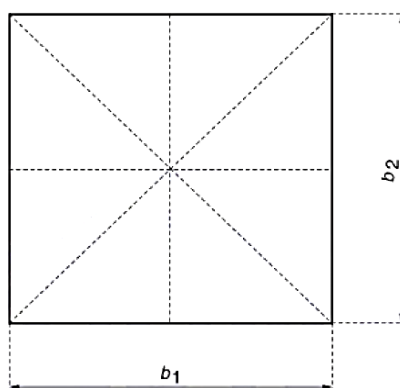
Com base na NBR 14810-2 (ABNT, 2018), os ensaios realizados foram de densidade (D), teor de umidade (U) e inchamento após 24h (I24h) a fim de avaliar o desempenho das propriedades físicas dos painéis.

4.2.7.1 Densidade (D)

Com base na norma ABNT NBR 14810-2 (2018), para determinação da densidade foram utilizados 10 corpos de prova para cada tratamento proposto para determinação da densidade e, com o auxílio de micrômetro (precisão 0,001 mm), paquímetro (precisão 0,1 mm) e balança (precisão 0,1 gr), foram aferidas as dimensões e massa de cada cp.

A Figura 15 ilustra um desenho esquemático com os locais para aferição das espessuras de cada corpo de prova.

Figura 15 – Desenho esquemático do cp para determinação da densidade



Fonte: ABNT (2018).

Obtidos os valores das dimensões e massas, foram calculados os volumes por meio da Equação (1):

$$V = b1 \times b2 \times e \quad (1)$$

No qual:

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).

Em seguida foram determinadas as densidades dos corpos de prova através da Equação (2):

$$D = \frac{M}{V} \times 1.000 \quad (2)$$

Onde:

D = densidade do cp (g/cm³);

M = massa do cp (g);

V = volume do cp (mm³).

4.2.7.2 Umidade (U)

Conforme NBR 14810-2 (ABNT, 2018), para a determinação do teor de umidade são considerados 10 cps para cada mistura proposta, com dimensões de 50 x 50 x espessura do cp (mm).

Com o auxílio de uma balança de precisão 0,01 g, foram aferidas as massas úmidas (massas iniciais) e em seguida os corpos de prova foram secos em estufa à temperatura de 103 °C ± 2 °C e aferidas as massas secas (massas finais) de cada corpo de prova.

O teor de umidade foi calculado através da Equação (3):

$$U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3)$$

No qual:

U = teor de umidade do cp (%);

Mu = massa úmida do cp (g);

Ms = massa seca do cp (g).

4.2.7.3 Inchamento em espessura após 24h (I24h) e Absorção de água após 24 h (A24h)

Com base na ABNT NBR 14810-2 (2018), foram utilizados 10 cps para cada mistura proposta com suas espessuras aferidas para a determinação do inchamento em espessura após 24 horas.

De acordo com processo metodológico, os cps foram submersos em água deionizada, utilizando-se um recipiente de PVC e telas metálicas com pesos, para garantir que os cps permaneçam submersos com uma lâmina de água de 25mm.

Após 24h são aferidas novamente as espessuras dos cps e a partir da Equação 4, determinados os teores de inchamento em espessura após 24h das amostras.

$$I = \frac{E_f - E_i}{E_i} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

I = inchamento em espessura do cp(%);

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

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

Utilizando a Equação 5 foram calculados os teores de absorção de água após

24h através das medições de espessura final (Ef) e inicial (Ei), obtidas em ensaio.

$$A_{24h} = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

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

M_u = massa úmida do cp (g);

M_s = massa seca do cp (g).

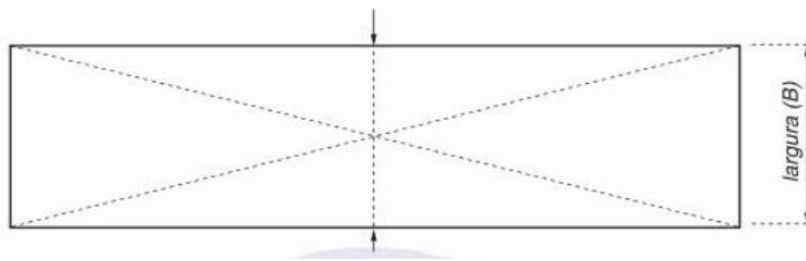
4.2.8 Ensaios mecânicos

De acordo com as orientações contidas na ABNT NBR 14810-2/2018, os ensaios mecânicos são realizados para determinação da resistência à flexão (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e tração perpendicular (TP), por meio da máquina universal de ensaios EMIC GR048, com capacidade de carga de 300kN.

4.2.8.1 Ensaio de flexão estática

Para a realização do ensaio de flexão, são utilizados 12 cps com dimensões de 350 x 50 x e mm, extraídos dos painéis produzidos para cada proposta de mistura, sendo o valor de e (*espessura*), variando entre 9 e 12 mm. A Figura 16 ilustra um desenho esquemático de um cp para o referido ensaio.

Figura 16 – Desenho esquemático do cp para o ensaio de Flexão Estática



Fonte: ABNT (2018).

Em relação a distância entre apoios (vão) utilizado no ensaio dos corpos de prova, foram determinados pela Equação (6).

$$D = 20 \times E \quad (6)$$

No qual:

D = distância entre apoios do aparelho (mm);

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

4.2.8.2 Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR)

Os valores de resistência à flexão estática (MOR) foram calculados por meio da Equação (7), a partir do resultado da força de ruptura lido no medidor de cargas da máquina.

$$MOR = \frac{1,5 \times (P \times D)}{B \times (E)^2} \quad (7)$$

Onde:

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

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

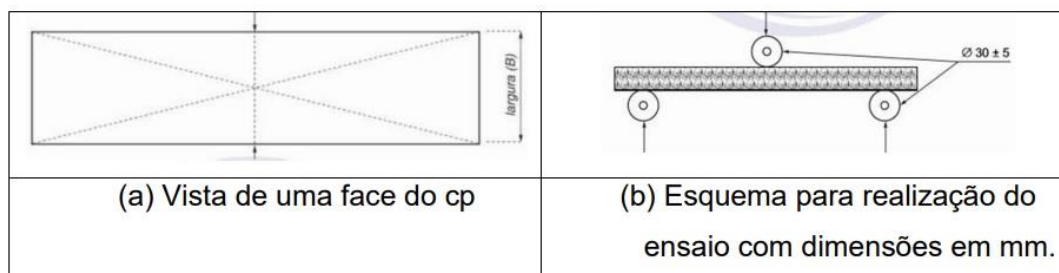
D = distância entre apoios do aparelho (mm);

B = largura do cp (mm);

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

De acordo com a ABNT NBR 14810-2/2018, o ensaio consiste em romper o corpo de prova à flexão, conforme ilustra a Figura 17, aplicando-se um aumento gradual de carga, tracionando as faces inferiores e comprimindo as faces superiores.

Figura 17 – Desenho esquemático para a realização do ensaio de flexão



(a) Vista de uma face do cp.

(b) Esquema para realização do ensaio com dimensões em mm.

Fonte: Adaptado da NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

4.2.8.3 Módulo de Elasticidade (MOE)

Os valores do módulo de elasticidade (MOE) foram calculados por meio da Equação (8), a partir dos resultados das cargas no limites proporcionais e deflexões correspondentes, registrado no indicador de cargas da máquina.

$$MOE = \frac{P1 \times D^3}{d \times 4 \times B \times E^3} \quad (8)$$

No qual:

MOE = módulo de elasticidade (MPa);

P1 = carga no limite de proporcionalidade 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).

4.2.8.4 Resistência à Tração Perpendicular (TP)

Conforme proposto em documento normativo para determinação da TP, devem ser ensaiados no mínimo 10 cps para cada tratamento proposto, nas dimensões de 50 x 50 x 12 mm, contudo foram ensaiados 12 cps para cada conjunto de 3 painéis (1 mistura).

Em relação a realização do ensaio de determinação da TP, inicialmente as superfícies dos cps foram regularizadas através da utilização de uma lixadeira de fita afim de propiciar uma melhor adesão na colagem em suportes metálicos. Após realização da limpeza dos corpos de provas com tinner, os suportes metálicos foram fixados com resina Epóxi denominada Araldite Profissional.

Decorridos período de 48h para fixação dos suportes metálicos os cps foram submetidos ao ensaio para determinação da TP utilizando-se máquina universal de para ensaios mecânicos.

A partir dos resultados de ensaios obtidos, foram determinados os valores de TP utilizando as Equações (9) e (10).

$$TP = \frac{P}{S} \quad (09)$$

$$S = b1 \times b2 \quad (10)$$

Onde:

TP = resistência à tração perpendicular (MPa);

P = carga de ruptura (N);

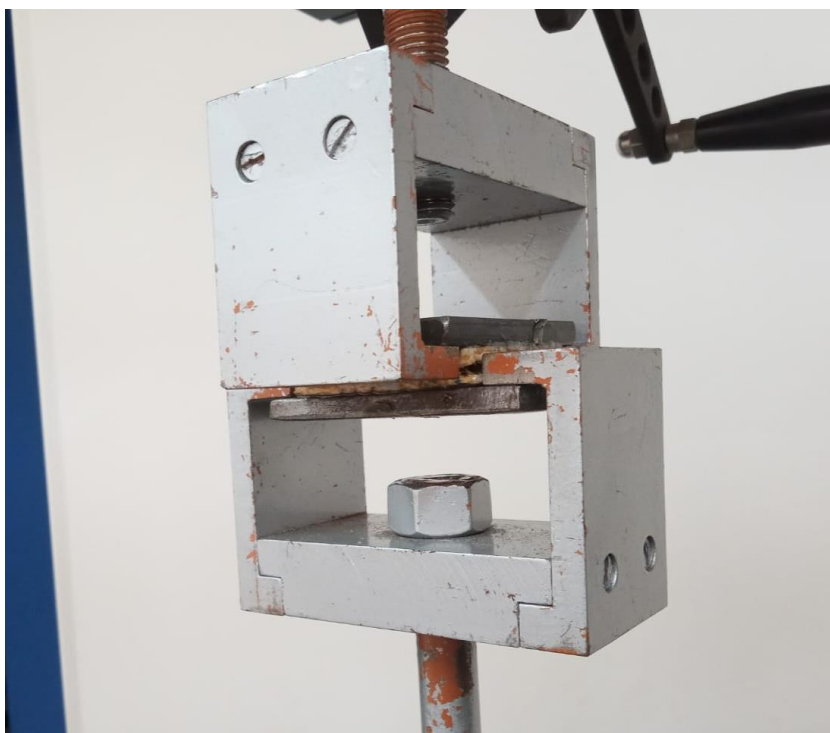
S = área da superfície do cp (mm²);

b1 = dimensão do cp (mm);

b2 = dimensão do cp (mm).

A figura 18 de um dos corpos de prova rompidos após o ensaio de tração perpendicular ilustra como o ensaio é realizado, evidenciando o processo de tracionamento das faces do corpo de prova. Nesta imagem, pode-se observar a aplicação da força que rompe o corpo de prova, destacando a adesão entre as chapas e as faces do corpo de prova. Essa representação visual é fundamental para compreender a metodologia do ensaio e a forma como os materiais respondem às tensões aplicadas, permitindo uma análise detalhada da qualidade da colagem e da integridade estrutural dos painéis estudados.

Figura 18 - Posicionamento de corpo de prova para ensaio de tração perpendicular



Fonte: Autoria própria.

4.2.9 Produção dos painéis aglomerados

A técnica de homogeneização do adesivo de poliuretano (PUR) às partículas foi realizada conforme descrito na literatura, seguindo os métodos empregados por Herradon (2023), Souza (2022), Cazella (2022), Trevisan (2021), Bispo (2021) e Gilio (2020). Nesse processo, o poliál foi adicionado inicialmente, seguido por uma breve mistura manual e, em seguida, misturado por mais 5 minutos em tambor rotatório (betoneira). Posteriormente, o mesmo procedimento foi repetido para adição e

homogeneização do segundo componente do adesivo (pré-polímero) às partículas.

Essa técnica de homogeneização tem como objetivo retardar a cura do adesivo, promovendo um encapsulamento mais eficaz das partículas e reduzindo a possibilidade de formação de concentrações de adesivo e bolhas no interior do painel aglomerado, conforme relatado por Campos e Lahr (2004) e Sugahara (2018).

Posteriormente ao processo de homogeneização do adesivo de poliuretano (PUR) às partículas, procedeu-se à preparação do colchão de partículas utilizando uma forma de madeira com dimensões de 35 x 35 cm. Em seguida, foi aplicada uma pré-prensagem a frio, seguida pela prensagem do colchão de partículas formado utilizando um sistema de controle de temperatura e pressão em uma prensa hidráulica.

As imagens ilustradas na figura 18 ilustram a etapa de remoção da forma de madeira, após prensagem a frio, e posicionamento para prensagem utilizando a prensa hidráulica.

Figura 19 – Etapas para produção de um painel de partículas em prensa hidráulica com controle de temperatura e pressão



(a) Formadora com colchão de partículas em seu interior.



(b) Colchão de partículas após remoção da formadora de colchão.



(c) Painel de partículas após prensagem.

Fonte: Autoria própria.

Durante o processo de prensagem, uma pressão de 5 MPa foi aplicada por um período total de 10 minutos e 30 segundos. Esse período compreendeu 5 minutos

iniciais de prensagem, seguidos por um alívio de pressão de 30 segundos e mais 5 minutos finais de prensagem, mantendo uma temperatura de 160°C. Tais parâmetros foram selecionados com o objetivo de promover uma melhor adesão entre as partículas, acelerando a cura inicial do adesivo PUR e considerando a temperatura de transição vítrea do PET, conforme indicado por estudos anteriores (Ebewe, 2000; Awaja e Pavel, 2005). Além disso, esses valores foram escolhidos para evitar a formação de bolhas de gases no interior dos painéis.

Após o processo de prensagem, os painéis foram transferidos para um ambiente coberto, onde foram deixados à temperatura ambiente por 7 dias, permitindo a completa cura do adesivo PUR.

Em seguida realizou-se o esquadrejamento dos painéis para produção dos corpos de prova. Para cada propriedade avaliada foram preparados 10 cps e para o ensaio de flexão estática os corpos de prova foram preparados com dimensões em 350 x 50 x 12 mm, para os ensaios de resistência à tração perpendicular (TP), densidade (D), inchamento (I), absorção (AA) e umidade (U), foram preparados utilizando corpos de prova com dimensões de 50 x 50 x 12 mm.

4.2.10 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica amplamente utilizada na caracterização de materiais devido à sua capacidade de fornecer imagens de alta resolução e informações detalhadas sobre a morfologia e a composição de superfícies e interfaces. No contexto dos painéis aglomerados de madeira, a MEV permite a análise minuciosa da estrutura interna do material, revelando a distribuição e o tamanho das partículas de madeira, bem como a qualidade das ligações entre as partículas e a resina aglomerante. Essas informações são essenciais para compreender o desempenho mecânico e a durabilidade dos painéis, possibilitando melhorias nos processos de fabricação e na qualidade final do produto.

Para realização dos ensaios de MEV foram extraídas amostras dos cps rompidos, após os ensaios de tração perpendicular. As dimensões dos cps utilizados para MEV passaram a ter as dimensões de 1 x 1 x 0,4 cm.

Todos os procedimentos foram conduzidos no Departamento de Física e Química (DFQ), situado no Campus da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), Universidade Estadual Paulista (UNESP).

Para a execução do ensaio, os cps foram fixados com fita dupla face de carbono utilizando a "porta Stub" e, em seguida, foram metalizados com uma fina camada de ouro por meio do equipamento Quorum, modelo Q150TE. Posteriormente, foram analisados no equipamento ZEISS, modelo EVO LS15, equipado com o sistema EDS - OXFORD Instruments, modelo INCAx-act, para a realização da análise por MEV.

4.2.11 Análise estatística

Para a análise estatística dos resultados obtidos nesta pesquisa, utilizou-se a Análise de Variância (ANOVA) seguida pelo teste de Tukey. A ANOVA foi aplicada para determinar se existem diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos diferentes grupos de tratamento. Este método é adequado para comparar múltiplas amostras e verificar se as variações observadas nos resultados são devidas às condições experimentais ou ao acaso.

Após a detecção de diferenças significativas pela ANOVA, o teste de Tukey foi utilizado como um procedimento post hoc para realizar comparações múltiplas entre as médias dos grupos. Esse teste é ideal para identificar especificamente quais grupos diferem entre si, proporcionando uma análise detalhada das diferenças de desempenho entre as diferentes composições dos painéis. O uso combinado da ANOVA e do teste de Tukey permite uma compreensão mais precisa das variáveis estudadas e das interações entre elas, garantindo a robustez dos resultados estatísticos apresentados nesta pesquisa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados com relação aos ensaios das propriedades físicas e mecânicas dos painéis a avaliados segundo às propostas de misturas, de acordo com a literatura corrente e os documentos normativos referenciado.

5.1 Composição granulométrica

Conforme discutido por Araujo *et al.* (2019), há uma correlação entre as características das partículas e as propriedades finais dos painéis, o que também impacta o processo de produção. Diante desse contexto, serão analisadas as composições granulométricas das partículas presentes nas misturas, com o intuito de destacar as influências de cada variável considerada neste estudo.

Ainda de acordo com Araujo *et al.* (2019) a geometria das partículas exerce uma considerável influência nas propriedades finais dos painéis. Partículas de maior granulometria são favoráveis para aumentar a resistência à flexão (MOR), enquanto as de menor granulometria são vantajosas para aprimorar a tração perpendicular (TP).

Conforme indicado por Cazella (2022), as partículas de PET, em sua maioria, foram retidas nas peneiras de 0,595 e 1,19 mm, resultando em uma diminuição no módulo de finura. Isso evidencia a influência do aumento da proporção de partículas de PET em relação às de Pinus. Como resultado, as misturas com maiores quantidades de PET apresentaram uma composição granulométrica com partículas de menor comprimento, o que possibilitou um melhor preenchimento de vazios e uma maior interação entre as partículas de Pinus.

Nesse contexto, as composições granulométricas das partículas foram determinadas por meio dos percentuais de materiais retidos nas peneiras e dos módulos de finura (MF) das misturas, com o intuito de destacar as influências de cada variável considerada neste estudo.

Os resultados dos ensaios realizados com 100% de partículas de PET estão apresentados na Tabela 6, com a correspondente "curva S" ilustrada na Figura 20. Da mesma forma, os resultados referentes à composição granulométrica do Pinus estão apresentados na Tabela 7, sendo a respectiva "curva S" mostrada na Figura 21.

Tabela 6 – Composição granulométrica das partículas de PET

Peneira	Abertura	Massa retida	Retido	Massa retida acumulada	Retido acumulado
Nº	(mm)	(g)	(%)	(g)	(%)
3/8"	9,52	0,20	0,57	0,20	0,57
4	4,75	3,29	9,37	3,49	9,94
8	2,36	5,72	16,29	9,21	26,22
16	1,19	20,39	58,06	29,60	84,28
30	0,59	4,90	13,95	34,50	98,23
50	0,297	0,59	1,68	35,09	99,91
Fundo		0,03	0,09	35,12	100
TOTAL		35,112			419,15

Fonte: Autoria própria.

Figura 20 – Curva "S" para composição granulométrica do PET



Fonte: Autoria própria.

Conforme observado na Tabela 6, a distribuição das partículas na composição granulométrica com 100% de Pinus concentrou-se principalmente nas peneiras de número 16 (58,06%), seguido pela de número 8 (16,29%), correspondentes às aberturas de 1,19 mm e 2,36mm, respectivamente. O valor do módulo de finura (MF) foi de 4,19. Essa distribuição granulométrica ligeiramente uniforme é considerada vantajosa para a aplicação em painéis homogêneos, pois, poderá propiciar a produção de painéis com melhor estabilidade dimensional e consequentemente melhor qualidade.

De acordo com ensaio de composição granulométrica foram determinadas maiores quantidades de partículas na faixa de 1 e 2 mm, consequentemente, como visto anteriormente, haverá tendência de maior resistência na Tração Perpendicular, devido a maior superfície específica das partículas.

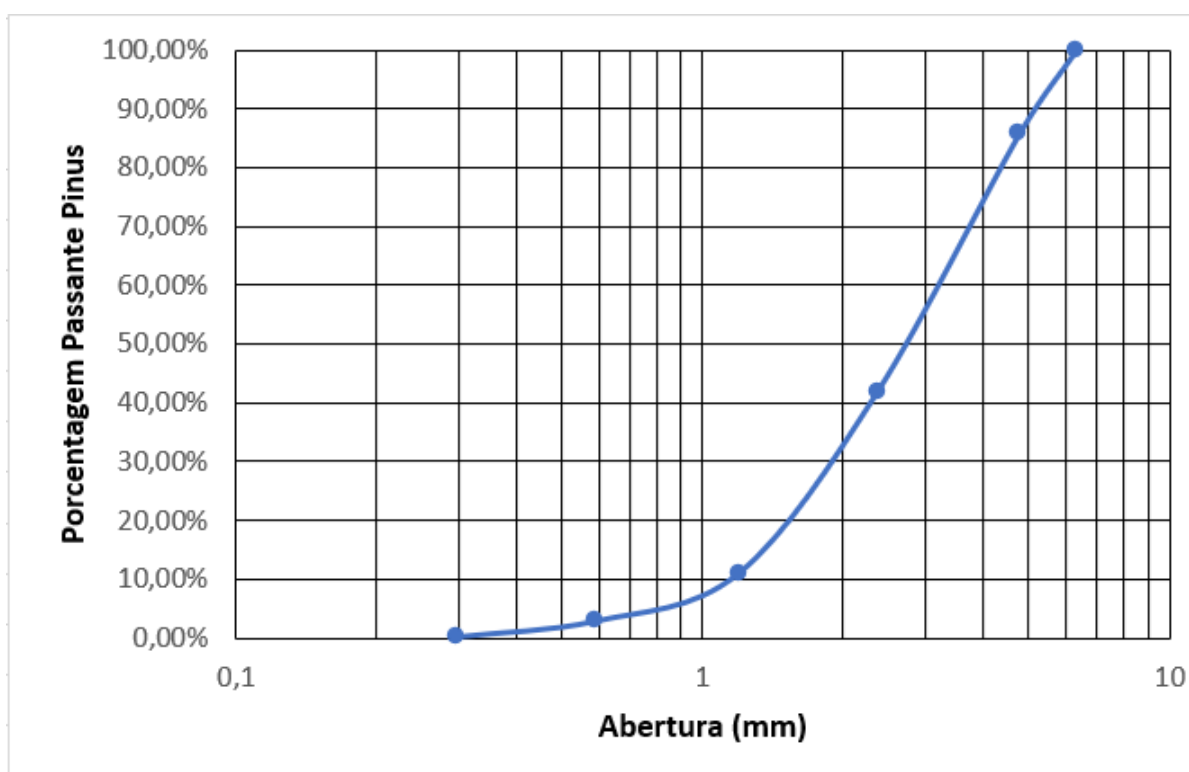
Referente a composição granulométrica com 100% PET, observa-se na Tabela 7 que as partículas ficaram retidas principalmente nas peneiras de nº8 (43,87%), nº16 (30,92%) e, com valor de MF igual a 4,58.

Tabela 7 – Composição granulométrica das partículas de Pinus

Peneira	Abertura	Massa retira	Retido	Massa retida acumulada	Retido acumulado
Nº	(mm)	(g)	(%)	(g)	(%)
3/8"	9,52	0,00	0,00	0	0,00
4	4,75	5,00	14,27	5,00	14,27
8	2,36	15,36	43,87	20,36	58,15
16	1,19	10,83	30,92	31,19	89,07
30	0,59	2,84	8,11	34,03	97,17
50	0,297	0,95	2,72	34,98	99,89
Fundo		0,04	0,11	35,02	100,00
TOTAL		35,02			458,35

Fonte: Autoria própria.

Figura 21 – Curva "S" para composição granulométrica do PET



Fonte: Autoria própria.

5.2 Umidade das partículas

Com base nos estudos de Kolmann (1975) deve ser considerado o intervalo de 3 a 12% de umidade das partículas na produção de painéis derivados de madeira.

Nos estudos de Dotun, Adesoji e Oluwatimilehin (2018) utilizando pó de serra com teor de umidade variando de 2 a 8% na produção de painéis compostos de pó de serra e PET reciclado de garrafas, fazendo-se substituições de 10, 20, 30, 40 e 50% de pó de serra por PET, com 20% de UF em relação ao volume dos painéis. Tais autores constataram boa interação das partículas com o adesivo na mistura e consequentemente, no desempenho mecânico dos painéis avaliados.

O referido intervalo de umidade das partículas é recomendado afim de evitar o acúmulo excessivo de vapor, a formação de bolhas e a ruptura prematura dos painéis durante o processo de prensagem térmica. Garantindo assim máximo desempenho de resistência mecânica dos painéis.

Conforme ilustrado pela tabela 9, os teores médios de umidade das partículas de Pinus e PET, utilizados para produção dos painéis aglomerados.

Tabela 8 – Teor de umidade das partículas de Pinus e PET

Partículas	Teor de umidade médio (%)
Pinus	4,22
PET	0,12

Fonte: Autoria própria.

5.3 Massa específica das partículas

A tabela 10 apresenta as massas específicas das partículas de Pinus e PET. A massa específica das partículas de Pinus foram obtidas através de ensaio e a massa específica de PET foram obtidas através de literatura.

Tabela 9 – Massa específica das partículas de Pinus e PET

Partícula	ρ_s (g/cm³)
Pinus	0,60
PET	1,36

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que as partículas de Pinus apresentaram massa específica inferior a massa específica obtida pelas partículas de PET.

5.4 Densidade

Segundo os estudos desenvolvidos por Cazella (2022), foram produzidos painéis de alta densidade para propostas de painéis com densidade nominal de 0,7 g/cm³ e proporções de pinus/PET de 50/50 e 70/30. Nos estudos foi verificado que devido o polímero possuir massa específica maior que a madeira Pinus, ocorreu um aumento significativo da massa específica dos painéis. Com base nos estudos realizados por Cazella, foi proposto para produção dos painéis densidade nominal de 0,55 g/cm³.

De acordo com estudos de Rahman *et al.* (2013) e Dotun, Adesoji e

Oluwatimilehin (2018), ao substituir partículas de madeira por PET, verificou-se que os painéis apresentaram maior densificação e compactação e se esperou nos estudos desta pesquisa que as misturas propostas produzissem painéis com média densidade, conforme requisitos normativos da NBR 14810-2 (ABNT, 2018) e ANSI A208.1 (2016), conforme adaptado na tabela 10.

Tabela 10 – Classificações normativas de Densidade

Classificação	NBR 14810-2 (2018)	ANSI A208.1 (2016)
Baixa Densidade	$D < 0,551$	$D < 0,640$
Média Densidade	$0,551 > D > 0,750$	$0,640 > D > 0,800$
Alta Densidade	$D > 0,750$	$D > 0,800$

Fonte: Adaptado de NBR 14810-2 (ABNT, 2018) e ANSI A208.1 (2016).

Considerando que o painel aglomerado é um produto que depende de parâmetros para sua fabricação, vale ressaltar que a pressão de prensagem, temperatura e adesivo, são importantes parâmetros que influenciam na densidade, bem como resistência na Tração Perpendicular, bem como nas demais propriedades dos painéis.

A Tabela 11 resume os resultados de densidade (D) e as classificações normativas dos painéis produzidos com as misturas propostas.

Tabela 11 – Densidade das misturas e classificações normativas segundo ABNT NBR 14810-2 (2018) e ANSI A208.1 (2016)

Misturas	D	Classificação NBR	Classificação ANSI
	(g/cm³)	14810-2 (2018)	A208.1 (2016)
Mistura 1	1,022	Alta densidade	Alta densidade
Mistura 2	1,118	Alta densidade	Alta densidade
Mistura 3	1,079	Alta densidade	Alta densidade
Mistura 4	1,197	Alta densidade	Alta densidade
Mistura 5	0,948	Alta densidade	Alta densidade

Fonte: Autoria própria.

Conforme os estudos conduzidos por Dotun, Adesoji e Oluwatimilehin (2018), ao substituir as partículas de madeira por PET, os painéis demonstraram uma maior densificação e compactação em comparação com aqueles compostos apenas por madeira. Esses autores determinaram densidades de 0,537 g/cm³ para painéis contendo pó de serra (SD) com PET nas proporções de 70% SD + 30% PET e 0,710 g/cm³ para 50% SD + 50% PET. É importante observar que esses estudos foram conduzidos em misturas de SD com PET reciclado de garrafas, com substituições de 10%, 20%, 30% e 50% de SD por PET, utilizando 20% de UF como aglutinante.

Em outro estudo conduzido por Rahman *et al.* (2013), foram obtidos resultados semelhantes aos desta pesquisa, onde foram produzidos e avaliados painéis de "madeira-plástico" utilizando um processo similar ao da produção de painéis aglomerados. Neste estudo, uma pressão de 5 MPa foi considerada em uma mistura composta por pó de serra e partículas PET recicladas, sem adesivo aglutinante, durante 20 minutos de prensagem a uma temperatura de 190 °C. Os resultados de densidade obtidos foram de 0,857 g/cm³ para a proporção de 70% de pó de serra e 30% de PET, e 0,969 g/cm³ para a proporção de 50% de pó de serra e 50% de PET.

Com base nos estudos de Rahman *et al.* (2013) e Dotun, Adesoji e Oluwatimilehin (2018), ao substituir as partículas de madeira por PET, foi evidenciado que os painéis apresentaram uma maior densificação e compactação em comparação com os painéis compostos apenas por madeira. Evidenciando que o aumento da proporção de PET nas misturas melhorou as propriedades dos painéis, principalmente no que diz respeito às densidades.

5.5 Teor de umidade dos painéis

Em relação ao teor de umidade segundo a ABNT NBR 14810-2 (2018) os painéis devem apresentar umidade entre 5% e 13% e menor que 10% de acordo com ANSI A208.1 (2016), conseqüentemente, as misturas com PUR, PET e PINUS devem propiciar a produção de painéis que atendem essas exigências normativas.

Conforme a tabela 12 sobre os teores de umidade médios obtidos em cada mistura, coeficiente de variação e desvio padrão para cada mistura produzida.

Na Tabela 12 evidencia-se que os painéis de todas as misturas atendem aos requisitos normativos da ABNT NBR 14810-2 (2018) e da norma ANSI A208.1 (2016)

Considerando os resultados obtidos nos ensaios para determinação da densidade e teor de umidade dos painéis, realizou-se análise estatística para avaliar essas propriedades sob o ponto de vista do teste de contraste de média de Tukey.

A Tabela 12 apresenta a análise entre a densidade e o teor de umidade dos painéis fabricados.

Tabela 12 - Síntese dos resultados das densidades e dos teores de umidade

Pin-PET-PUR	ρ (kg/m ³)	TU (%)
75-15-10	1021.69 C (3.10 %)	4.72 AB (24.89 %)
50-40-10	1118.29 B (3.06 %)	3.71 BC (16.41 %)
60-30-5	1078.88 B (3.72 %)	4.95 A (11.70 %)
40-55-5	1197.38 A (2.89 %)	3.40 C (14.21 %)
50-50-0	958.31 D (7.13 %)	4.62 AB (23.07 %)
p-valor (AD)	0.664	0.878

Fonte: Autoria própria.

Notas: Do teste de contraste de médias de Tukey, **A** denota o tratamento associado ao maior valor médio da propriedade, **B** o segundo maior valor médio e assim de forma sucessiva, e letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si. Do teste de normalidade de Anderson-Darling (AD), p-valor superior ao nível de significância (5%) implica na normalidade na distribuição dos resíduos da ANOVA, o que valida os resultados do teste de Tukey.

Com base nos valores apresentados é possível avaliar que o aumento de PET em substituição ao pinus, em ambos cenários de 5 e 10% de PUR, promoveu resultados maiores estatisticamente com relação a densidade e reduziu o teor de umidade. A mistura 5 que contém 50% Pinus, 50% PET e 0% PUR apresentou valor estatístico diferente e inferior as demais misturas com relação a densidade, porém valor semelhante a mistura 1 (75%Pinus, 15% Pet e 10% PUR) em relação ao teor de umidade.

5.6 Inchamento em espessura após 24h (I24h) e Absorção de água após 24h (A24h)

Os estudos desenvolvidos por Santos . (2011), a partir da produção de painéis aglomerados constituídos com resíduo da madeira de candeia e de eucalipto, aglutinados com 12% do adesivo UF, foi evidenciado a influência das diferentes percentagens de PET na presença e na ausência de parafina. Em seus resultados de absorção após 24h na mistura de 50 % PET, observaram uma redução significativa

de aproximadamente 16 % da absorção de água, quando comparado com a mistura com 0 % de PET, portanto, foi possível inferir que a absorção de água nos painéis tende a diminuir com o aumento na substituição de madeira por PET.

Nos estudos de Cazella (2022), os painéis da mistura 50% PET e 10% de PUR apresentaram inchamento inferior a 4%, evidenciando a boa influência das partículas de PET no tratamento, proporcionando aglutinação e ocupação de espaços vazios no interior dos painéis, bem como no “envelopamento” das partículas por parte do PUR e conseqüentemente, resultando boa resistência à percolação de água no interior dos painéis.

Gilio (2020) em seus estudos com painéis homogêneos utilizando madeira de *hevea brasiliensis* e *tectonagrandis*, também evidenciou que o adesivo PUR apresenta características impermeáveis quando seu teor é aumentado de 5 para 10% na produção dos painéis.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de inchamento em espessura após 24 horas (I24H %) e absorção de água após 24 horas (A24H %), conforme apresentados na tabela 13, proporcionam a visualização sobre as propriedades dos painéis produzidos com diferentes misturas de madeira-PET.

Os ensaios em questão objetivaram avaliar os efeitos das diferentes misturas de partículas de Pinus, PET (polietileno tereftalato) e PUR nas propriedades de inchamento em espessura (I24H) e absorção de água após 24 horas (A24H) em painéis de madeira-PET. Foram realizadas cinco misturas distintas, variando a proporção de PET em relação à madeira, e os resultados foram analisados quanto à média, CV e desvio padrão.

Esses resultados indicam que as diferentes proporções de PET e as variadas proporções de PUR ou até mesmo sua ausência nas misturas, exercem influência significativa nas propriedades de I24H e A24H dos painéis produzidos com madeira e PET. A Mistura 5, com a maior proporção de PET, evidenciou os maiores valores de I24H e A24H, indicando uma maior suscetibilidade à absorção de água. Por outro lado, a Mistura 4, com a menor proporção de PET, apresentou os menores valores para ambas as propriedades, indicando menor tendência ao inchamento e à absorção de água. Estes resultados fornecem informações valiosas para a otimização da composição de painéis de madeira-PET, visando melhorar suas propriedades físicas e mecânicas.

Considerando os resultados obtidos nos ensaios para determinação da A24h

dos painéis, realizaram-se análise estatística para avaliar essas propriedades sob o ponto de vista do teste de contraste de média de Tukey.

A Tabela 13 apresenta a análise entre a densidade e o teor de umidade dos painéis fabricados.

Tabela 13 - Síntese dos resultados das absorções e inchamentos após 24h.

Pin-PET-PUR	Abs-24h (%)	Inc-24h (%)
75-15-10	29.45 B (31.41 %)	18.71 B (29.10 %)
50-40-10	10.69 C (23.54 %)	6.47 C (27.57 %)
60-30-5	29.15 B (26.46 %)	17.99 B (22.75 %)
40-55-5	9.78 C (30.64 %)	4.47 C (26.28 %)
50-50-0	88.16 A (28.42 %)	48.41 A (30.23 %)
p-valor (AD)	0.123	0.245

Fonte: Autoria própria.

Notas: Do teste de contraste de médias de Tukey, **A** denota o tratamento associado ao maior valor médio da propriedade, **B** o segundo maior valor médio e assim de forma sucessiva, e letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si. Do teste de normalidade de Anderson-Darling (AD), p-valor superior ao nível de significância (5%) implica na normalidade na distribuição dos resíduos da ANOVA, o que valida os resultados do teste de Tukey.

Com base na avaliação estatística dos resultados de A24H e I24H observou-se que para as misturas com 5 e 10 % de PUR a substituição de partículas de Pinus por PET, apresentaram diferenças estatísticas significativas. E os maiores resultados para A24H e I24H foram para a Mistura 5 (50% Pinus, 50% Pet e 0% PUR).

5.7 Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR)

De acordo com os estudos desenvolvidos por Cazella (2022), painéis constituídos por 50% Pinus, 50% de PET e 10% de PUR apresentaram aumento de 112,79% de MOR em relação aos painéis sem PET, ou seja, o aumento da resistência nos painéis pode está relacionado a inclusão de PET em substituição às partículas de Pinus.

Cazella (2022) verificou que nos painéis das misturas com 50% de Pinus, 50% de PET e 5% de PUR os valores determinados para o MOR foram bem próximos dos valores determinados para os painéis das misturas com 70% Pinus, 30% PET e com 10% de PUR, ou seja, o incremento da quantidade de PET em substituição às partículas de Pinus evidenciaram a melhoria da resistência do MOR, consequentemente, a substituição de partículas de madeira por pó de PET e Pó de

resina de Pinus nas misturas utilizando-se 5% de PUR e 5% de EPÓXI poderá representar uma boa alternativa para produção de painéis aglomerados de madeira.

Os resultados de resistência à flexão estática, representados pelo MOR, juntamente com o CV e o desvio padrão, para os painéis produzidos a partir das diferentes misturas, são apresentados na Tabela 14 abaixo:

Tabela 14 – Resultados médios de MOR, CV e Desvio padrão

Misturas	MOR
	(MPa)
Mistura 1	23,27
Mistura 2	32,64
Mistura 3	20,43
Mistura 4	30,09
Mistura 5	5,43

Fonte: Autoria própria.

Os painéis da mistura 2 apresentaram maior resistência média ao MOR de 32,64 MPa, enquanto para os painéis da mistura 5 foi determinada resistência de 5,43 MPa. De acordo com os resultados obtidos para os painéis da mistura 5, é provável que a temperatura de prensagem não tenha sido suficiente para o derretimento do PET e, conseqüentemente, não ocorreu o “envelopamento” das partículas de madeira e adesão eficiente entre as mesmas.

Esses resultados são cruciais para compreender o desempenho mecânico dos painéis produzidos com diferentes misturas de madeira-PET. A análise da resistência à flexão estática é fundamental para avaliar a capacidade dos painéis de suportar cargas e deformações, sendo um aspecto crucial no desenvolvimento de materiais para uma variedade de aplicações na indústria.

5.8 Módulo de Elasticidade (MOE)

Segundo estudos realizados por Rahman . (2013) com “madeira-plástico” compostos por pó de serra e partículas de PET reciclado, foram obtidos resultados de MOE de 1892,91 MPa para a proporção de 50% pó de serra, 50% de PET e 1433,93 MPa para proporção de 70% pó de serra e 30% de PET, sem o acréscimo de

aglutinante. A diferença significativa entre os resultados de MOE encontrados pelo autor pode ser associada à utilização do adesivo PUR, que possivelmente atuou com eficácia como aglutinante propiciando boa aglutinação e maior rigidez aos painéis; diferentemente do PET, utilizado como único aglutinante para as partículas de pó de serra nos estudos de Dotun, Adesojie Oluwatimilehin (2018).

Os resultados obtidos de MOE no estudo de Cazella (2020), também evidenciaram que o módulo de elasticidade aumentou em função do aumento da proporção de partículas de PET em relação às de Pinus. E também, identificou-se que a mistura 70% Pinus 30% PET utilizando 10% de PUR apresentou propriedade mecânica semelhante quando comparada a mistura 50% Pinus 50% PET utilizando 5% de PUR. Demonstrando também, a possibilidade de reduzir a quantidade de adesivo PUR buscando-se manter o mesmo padrão de rigidez, com o incremento da quantidade de PET reciclado na mistura.

Os resultados médios do módulo de elasticidade (MOE), juntamente com o coeficiente de variação e o desvio padrão, para os painéis produzidos para as misturas propostas no estudo, foram tabulados na Tabela 17 com base nos ensaios de flexão.

Tabela 15 – Resultados médios para MOE, CV e Desvio padrão

Misturas	MOE
	(MPa)
Mistura 1	2277
Mistura 2	2378
Mistura 3	2514
Mistura 4	2451
Mistura 5	530

Fonte: Autoria própria.

Os painéis da Mistura 3 apresentaram o maior valor médio de MOE, com 2514 MPa, indicando uma maior rigidez do material. Por outro lado, os painéis da Mistura 5

apresentaram o menor valor de MOE, com apenas 530 MPa, indicando uma menor rigidez.

A análise do MOE é fundamental para avaliar a capacidade dos painéis de suportar cargas e deformações, sendo um aspecto importante a ser considerado no desenvolvimento de materiais para diversas aplicações na indústria.

5.9 Resistência à Tração Perpendicular (TP)

Conforme citado por Maloney (1993), a resistência à tração perpendicular dos painéis está intrinsecamente ligada à quantidade e ao desempenho do adesivo aglutinante empregado na fabricação dos painéis. Com isso, o adesivo desempenha papel crucial na qualidade da adesão entre as partículas, influenciando diretamente essa propriedade mecânica do material.

Em estudos desenvolvidos por Ferreira e Knuth (2019), os autores produziram e avaliaram painéis aglomerados utilizando madeira de Teca, 12% de UF e adição de PET em proporções de 5, 10 e 15% em dois tamanhos diferentes de partículas (flakes com 0,2 x 5,0 x 8,0 mm e partículas menores que 2 mm). Nas misturas utilizando 5% de PET e partículas com dimensões inferiores à 2 mm, evidenciaram um aumento nos resultados de TP quando comparada à mistura sem adição de PET, sendo eles 0,60 MPa para 0% de PET e 0,67 MPa para adição de 5% de PET.

Cazella (2022) também constatou que a resistência à tração perpendicular é majorada a partir do aumento da proporção de partículas de PET em substituição às partículas de Pinus. Em análise comparativo, observou-se que a TP dos painéis da mistura com 50% Pinus e 50% PET aglutinados com 10% de PUR, apresentaram resistência 200% superior aos painéis sem PET em sua composição, sendo os resultados médios de 2,49 MPa e 0,83MPa, respectivamente.

A tabela 16 apresenta os valores médios obtidos pelos ensaios de resistência a tração perpendicular (TP), coeficiente de variação e o desvio padrão para os painéis produzidos com as misturas propostas.

Tabela 16 – Valores médios para o ensaio de Tração Perpendicular (TP), CV e Desvio padrão para respectivas misturas

Misturas	TP
	(MPa)
Mistura 1	1,35
Mistura 2	1,69
Mistura 3	1,39
Mistura 4	2,10
Mistura 5	0,19

Fonte: Autoria própria.

Os resultados revelam uma variação significativa na resistência à TP entre as diferentes misturas. Os painéis da Mistura 4 apresentaram a maior resistência média à TP, com um valor de 2,10 MPa, enquanto os painéis da Mistura 5 registraram a menor resistência, com apenas 0,19 MPa.

Os resultados do ensaio de TP indicam que a resistência à tração dos painéis de madeira-PET varia significativamente de acordo com a composição das misturas. A incorporação de diferentes proporções de PET nas misturas influencia diretamente a resistência à tração perpendicular dos painéis. Estes resultados são fundamentais para a produção de painéis de madeira-PET com melhores qualidades e para aplicações específicas quando solicitadas.

Considerando os resultados obtidos nos ensaios para determinação da do MOR, MOE e TP dos painéis, realizou-se análise estatística para avaliar essas propriedades sob o ponto de vista do teste de contraste de média de Tukey.

A Tabela 17 apresenta a análise estatística entre o MOR, MOE e TP dos painéis fabricados.

Tabela 17 – Síntese dos resultados de MOR, MOE e TP dos painéis fabricados.

Pin-PET-PUR	MOR (MPa)	MOE (MPa)	TP (MPa)
75-15-10	23.27 B (23.27 %)	2277 A (28.47 %)	1.35 C (18.14 %)
50-40-10	32.64 A (12.74 %)	2378 A (26.42 %)	1.69 B (15.09 %)
60-30-5	20.43 B (14.83 %)	2514 A (20.38 %)	1.39 C (18.77 %)
40-55-5	30.09 A (19.37 %)	2451 A (23.84 %)	2.10 A (7.51 %)
50-50-0	5.43 C (31.72 %)	530 B (31.58 %)	0.19 D (38.63 %)
p-valor (AD)	0.629	0.837	0.876

Fonte: Autoria própria.

Notas: Do teste de contraste de médias de Tukey, A denota o tratamento associado ao maior valor médio da propriedade, B o segundo maior valor médio e assim de forma sucessiva, e letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si. Do teste de normalidade de Anderson-Darling (AD), p-valor superior ao nível de significância (5%) implica na normalidade na distribuição dos resíduos da ANOVA, o que valida os resultados do teste de Tukey.

Com base nas análises estatísticas apresentadas nas Tabelas 12, 13 e 17, em cada propriedade avaliada nota-se que os p-valores do teste de normalidade de Anderson Darling foram superiores ao nível e 5% de significância, o que valida os resultados obtidos do teste de contraste de médias de Tukey.

Com referência a Tabela 19 em função das análises realizadas é possível inferir que a adição de partículas de Pet em substituição as partículas de Pinus proporcionou maiores valores para MOR (MPa) e Tração perpendicular (MPa) quando avaliado as misturas 1 (75% Pinus, 15% PET e 10% PUR) e 2 (50% Pinus, 40% PET e 10% PUR) que possuíam 10% de PUR, não causando alteração significativa com relação a MOE (MPa). O comportamento se comprovou também para as misturas 3 (60% Pinus, 30% Pet e 5% PUR) e 4 (40% Pinus, 55% Pet e 5% PUR). Com relação a mistura 5 (50% Pinus, 50% Pet e 0% PUR) os resultados foram significativamente inferiores as demais misturas em todas propriedades mecânicas avaliadas, MOR (MPa), MOE (MPa) E TP (MPa).

Ao se verificar as Tabelas 12, 13 e 17 evidencia-se que a melhor performance foi dos painéis referentes a mistura 4 (40% Pinus, 55% Pet e 5% PUR), considerando menores valores de Teor de umidade (%), inchamento e absorção após 24 horas (%) e os maiores valores para MOR (MPa), MOE (MPa) E TP (MPa). Tal conclusão possivelmente tem relação ao incremento das partículas de Pet em substituição as partículas de Pinus, o que demonstra que é possível realizar esta substituição e redução do adesivo PUR sem comprometer os resultados, quando comparado a painéis com maiores teores de PUR. Entretanto, os valores obtidos pela mistura 4 só

puderam ser classificadas pela ANSI A208.1 (2016) na categoria H-2.

Vale ressaltar que com a análise dos valores apresentados nas Tabelas 12, 13 e 17 identificou-se também que os piores resultados foram obtidos nos painéis provenientes da mistura 5 (50% Pinus, 50% Pet e 0% PUR), em que resultaram em maiores valores de Teor de umidade (%), inchamento e absorção após 24 horas (%) e menores desempenhos com relação a MOR (MPa), MOE (MPa) E TP (MPa). Os valores obtidos pelos painéis da mistura 5 (50% Pinus, 50% Pet e 0% PUR) demonstram que a ausência do adesivo não teve performance substituída pelo PET com a temperatura de prensagem de 160 °C, escolhida por ser a temperatura de início da faixa da temperatura de secagem do PET (160 °C a 180 °C) visando produção em larga escala. A mistura 5 não resultou em valores que puderam ser classificados pelas normas ABNT NBR 148410-2 (2018) ou ANSI A208.1 (2016).

O teste de contraste de médias de Tukey também foi aplicado com o propósito de auxiliar no entendimento do efeito isolado de cada fator (Pinus, PET, PUR) em cada propriedade física e mecânica avaliada. Nas Tabelas 20, 21 e 22 são apresentados os resultados do teste de Tukey considerando-se a influência dos níveis dos teores de partículas de madeira de Pinus, dos teores de partículas de PET e dos teores do adesivo PUR. Cabe destacar que os p-valores do teste de normalidade de Anderson-Darling sobre os resíduos da análise de variância (5% de significância) variaram no intervalo entre 0.086 a 0.881, o que valida os resultados do teste de Tukey.

A Tabela 18 apresenta o teste de contraste entre as propriedades dos painéis afetadas pelos teores de partículas de madeira de Pinus sp.

Tabela 18 – Resultados do teste de contraste de médias de Tukey das propriedades físicas e mecânicas afetadas pelos teores de partículas de madeira de Pinus

Prop.	Teor de partículas de madeira de Pinus			
	40%	50%	60%	75%
ρ	A	B	B	B
TU	B	AB	A	A
Abs-24h	B	B	A	A
Inc-24h	C	CB	B	A
MOR	A	B	B	B
MOE	A	B	A	A
TP	A	B	B	B

Fonte: Autoria própria.

Notas: Do teste de contraste de médias de Tukey, A denota o tratamento associado ao maior valor médio da propriedade, B o segundo maior valor médio e assim de forma sucessiva, e letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si.

Com base no teste Tukey aplicado isoladamente para as partículas de Pinus foi possível avaliar mudanças significativas estatisticamente a partir da redução de 50 a 40%, onde os resultados de todas propriedades físicas e mecânicas melhoraram consideravelmente.

A Tabela 19 apresenta o teste de contraste entre as propriedades dos painéis afetadas pelos teores de partículas PET.

Tabela 19 – Resultados do teste de contraste de médias de Tukey das propriedades físicas e mecânicas afetadas pelos teores de partículas de PET

Prop.	Teor de partículas de PET				
	15%	30%	40%	50%	55%
ρ	B	B	B	C	A
TU	A	A	B	B	B
Abs-24h	B	B	C	A	B
Inc-24h	B	B	C	A	B
MOR	B	B	A	C	A
MOE	A	A	A	B	A
TP	B	B	B	C	A

Fonte: Autoria própria.

Notas: Do teste de contraste de médias de Tukey, A denota o tratamento associado ao maior valor médio da propriedade, B o segundo maior valor médio e assim de forma sucessiva, e letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si.

Com base no teste Tukey aplicado isoladamente para as partículas de Pet foi possível verificar padrão no comportamento da densidade, absorção e inchamento após 24 horas, onde apresentaram significativamente variação apresentando significativa queda nos valores seguido de grande aumento, para densidade ocorreu a redução com 50% de PET e aumento com 55% e para absorção e inchamento ocorreu redução com 40% e aumento com 50%.

Com fundamento nos valores estatísticos para MOR foi possível avaliar o comportamento de significativa queda seguido de aumento, e posterior retorno aos valores iniciais ocorrendo respectivamente com os valores de 40%, 50% e 55%. Com relação a TP a diferença de comportamento está apenas nos 55% em que os resultados foram significativamente superior aos resultados com porcentagens menores de PET na mistura. Com base nos valores de MOE houve significativa

redução com 50% de PET, retornando aos valores superiores em todas as demais porcentagens (15%, 30%, 40% e 55%).

A Tabela 22 apresenta o teste de contraste entre as propriedades dos painéis afetadas pelos teores do adesivo PUR.

Tabela 20 – Resultados do teste de contraste de médias de Tukey das propriedades físicas e mecânicas afetadas pelos teores do adesivo PUR

Prop.	Teor de adesivo PUR		
	0%	5%	10%
ρ	B	A	A
TU	A	A	A
Abs-24h	A	B	B
Inc-24h	A	B	B
MOR	B	A	A
MOE	B	A	A
TP	B	A	A

Fonte: Autoria própria.

Notas: - Do teste de contraste de médias de Tukey, A denota o tratamento associado ao maior valor médio da propriedade, B o segundo maior valor médio e assim de forma sucessiva, e letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si.

Baseado nos resultados do teste de contraste de médias de Tukey para as propriedades físicas e mecânicas afetadas pelos teores do adesivo PUR, foi possível constatar significativa variação a partir da adição de 5% de PUR, exceto para os teores de umidade que se mantiveram os mesmos. A partir de 5% de PUR, e sem alteração quando avaliado em comparação a 10% de PUR, houve aumento significativo da densidade, redução significativa da absorção e inchamento após 24 horas e aumento significativo de MOR, MOE e TP, o que evidencia que não há variação com a adição de 5 ou 10 % de PUR.

5.10 Classificação de acordo com ABNT NBR 14810-2 (2018) e ANSI A208.1(2016)

Os resultados dos ensaios são apresentados pelas tabelas 14, 15 e 16 e associa as classificações feitas pela ABNT NBT 14810-2(2018), conforme tabela 17.

Tabela 21 – Análise dos resultados obtidos nas propriedades dos painéis e suas respectivas misturas

Misturas	Espessura (mm)	I 24 (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P. (MPa)
Mistura 1	6,39	18,71	23,27	2277	1,35
Mistura 2	5,69	6,47	32,64	2378	1,69
Mistura 3	6,17	17,99	20,43	2514	1,39
Mistura 4	5,80	4,47	30,09	2451	2,10
Mistura 5	7,07	48,41	5,43	530	0,19

Fonte: Autoria própria.

A classificação dos painéis, levando em consideração as misturas, segundo os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 148410-2 (2018), proporciona uma avaliação da aplicabilidade de cada painel seguindo o desempenho apresentado. Os critérios estabelecidos por faixa de espessura nominal, juntamente com os valores máximos de inchamento em espessura após 24 horas (I24 %), Módulo de Ruptura (MOR), Módulo de Elasticidade (MOE) e Tração Perpendicular (TP), permitem uma análise abrangente da adequação dos painéis para diversas aplicações na indústria. A tabela 22 apresenta de forma visual os limites estabelecidos pela ABNT NBR 148410-2 (2018) e qual mistura proporcionou aos painéis resultados que atendessem as especificações. A tabela 23 apresenta as siglas e orientações de uso das classificações conforme NBR 148410-2 (2018).

Tabela 22 – Limites estabelecidos pela ABNT NBR 148410-2 (2018) para classificação dos painéis e apresentação de Mistura que atendeu a cada classificação

Classificação ABNT NBR 148410-2 (2018)	Crítérios por faixa de espessura nominal	I 24 máximo (%)	MOR Mínimo (MPa)	MOE Mínimo (MPa)	T.P. Mínimo (MPa)	Painéis das misturas
P2	Espessuras > 6 a 13 mm	22	11	1800	0,40	M1 M2 M3 M4
P3	Espessuras > 6 a 13 mm	17	15	2050	0,45	M1 M2 M3 M4
P4	Espessuras > 6 a 13 mm	16	16	2300	0,40	M3
P5	Espessuras > 6 a 13 mm	11	18	2550	0,45	
P6	Espessuras > 6 a 13 mm	16	20	3150	0,60	
P7	Espessuras > 6 a 13 mm	10	22	3350	0,75	

Fonte: Autoria própria.

Tabela 23 – Legendas de siglas e orientações de uso das classificações conforme NBR 148410-2 (2018)

Sigla classificação ABNT NBR 148410-2 (2018)	Orientação de uso conforme ABNT NBR 148410-2 (2018)
P2	Painéis não estruturais para uso interno em condições secas;
P3	Painéis não estruturais para uso em condições úmidas;
P4	Painéis estruturais para uso em condições secas;
P5	Painéis estruturais para uso em condições úmidas;
P6	Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições secas;
P7	Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições úmidas.

Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados dos ensaios, as misturas foram classificadas de acordo com os critérios da ABNT NBR 148410-2 (2018) em diferentes tipos de painéis, representados pelas categorias de P2 a P7. Para as espessuras entre 6 e 13 mm, as misturas foram categorizadas da seguinte forma. A classificação P2 exige valor máximo de 22% para I24, MOR mínimo de 11 MPa, MOE mínimo de 1800 MPa e valor mínimo de 0,40 MPa para TP. Com base nos resultados dos ensaios, os painéis das Misturas 1 e 3 atenderam a todos os critérios estabelecidos para a classificação como painéis do tipo P2.

As demais classificações e mistura não se verificaram adequação de resultados obtidos e exigidos pela norma ABNT NBR 148410-2 (2018). Os painéis da Mistura 2 não pode ser classificada como P3 apenas por sua espessura que foi de 5,67 mm e o mínimo estabelecido é de 6,00 mm. Os painéis da Mistura 4 também não podem ser classificados como P4 também devido a sua espessura que foi de 5,80, sendo o mínimo necessário 6,00 mm.

A Tabela 24 estão apresenta os requisitos normativos da ANSI A208.1 (2016) e as respectivas classificações dos painéis segundo suas misturas perante os resultados obtidos dos painéis propostos no estudo. A tabela 25 apresenta as siglas e orientações de uso das classificações conforme ANSI A208.1 (2016).

Tabela 24 – Requisitos normativos da ANSI A208.1 (2016) e as respectivas classificações das misturas

Classificação ANSI A208.1 (2016)	MOR Mínimo (MPa)	MOE Mínimo (MPa)	T.P. Mínimo (MPa)	Painéis das misturas
H-1	14,9	2160	0,81	M1 M2 M3 M4
H-2	18,5	2160	0,81	M1 M2 M3 M4
H-3	21,1	2475	0,90	M1 M2 M3
M-0	7,6	1380	0,31	M1 M2 M3 M4
M-1	10	1550	0,36	M1 M2 M3 M4
M-S	11	1700	0,36	M1 M2 M3 M4
M-2	13	2000	0,40	M1 M2 M3 M4
M-3i	15	2500	0,50	M3
M-3	16,5	2750	0,55	
PBU	11	1725	0,40	M1 M2 M3 M4
D-2	16,5	2750	0,55	
D-3	19,5	3100	0,55	

Fonte: Autoria própria.

Tabela 25 – Legendas de siglas e orientações de uso das classificações conforme ANSI A208.1 (2016)

Sigla classificação ANSI A208.1 (2016)	Orientação de uso conforme ANSI A208.1 (2016)
H	High Density–Alta Densidade
M	Medium Density – Média densidade
LD	Low Density – Baixa Densidade
D	Manufactured Home Decking – Decks Caseiros Fabricados
PBU	Underlayment – Subpavimento

Fonte: Autoria própria.

Os painéis da Mistura 1 atendem todos requisitos mínimos para classificação H-3. A classificação H-2 foi obtida por painéis de três misturas, a Mistura 2 devido ao valor de MOE de 2277,77 MPa, os painéis da Mistura 3 devido ao MOR de 20,43 MPa e a mistura 4, devido ao valor de MOR de 20,43 MPa. A mistura 5 não obteve nenhum resultado para se classificar em nenhum dos tipos, devidos aos valores inferiores aos mínimos em todos os parâmetros.

5.11 Considerações

Com o intuito de realizar uma análise comparativa abrangente dos resultados obtidos nos painéis das diferentes misturas, foi elaborada a tabela 27. Esta tabela compila e exibe de forma sistemática todas as propriedades físicas e mecânicas dos painéis, bem como das misturas utilizadas nesta pesquisa. Tal abordagem visa oferecer uma visão abrangente e detalhada das características e desempenho dos painéis produzidos em relação às composições utilizadas. Ademais, a tabela 5 elaborada e apresentada no capítulo metodologia no item definição das misturas (pag. 51), complementa essa análise, fornecendo dados específicos sobre as misturas, o que permite uma comparação direta entre os resultados obtidos nos ensaios e as composições das misturas. Essa estratégia de apresentação dos dados permite uma avaliação minuciosa e fundamentada do impacto das diferentes composições na qualidade e nas propriedades dos painéis resultantes.

Tabela 26 – Propriedades físicas e mecânicas das misturas

Misturas	D	I24H	A24H	MOR	MOE	TP
	(g/cm ³)	(%)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Mistura 1	1,022	21,72	29,46	23,27	2477,07	1,35
Mistura 2	1,118	6,47	10,59	32,65	2277,77	1,69
Mistura 3	1,079	19,59	29,15	20,43	2513,72	1,39
Mistura 4	1,197	5,27	11,08	29,09	2451,31	2,10
Mistura 5	0,948	48,41	88,16	3,03	460,00	0,18

Fonte: Autoria própria.

Tabela 27 – Propostas de misturas para produção dos painéis aglomerados

Misturas	Pinus sp	PET	PUR
	(%)	(%)	(%)
Mistura 1	75	15	10
Mistura 2	50	40	10
Mistura 3	65	30	5
Mistura 4	40	55	5
Mistura 5	50	50	0

Fonte: Autoria própria.

Notas: Pinus sp - Partículas de Pinus sp; PPET – Pó de Politereftalato de Etileno; PUR - Adesivo poliuretano bicomponente derivado de mamona;

Com base nas tabelas 27 e 5, é possível evidenciar que os valores de MOR e TP aumentaram com o aumento da proporção de PET, ao comparar os valores obtidos dos painéis das Misturas 1 e 2, Mistura 3 e 4 e com todos os resultados obtidos com os painéis da Misturas 5. Os valores de I24H e A24H reduziram com o aumento da proporção de PET, ao comparar a Mistura 1 com a 2, Mistura 3 com a 4 e todas misturas com a 5. Com relação a densidade é possível concluir que o valor diminuiu conforme a proporção de PET foi reduzida nas misturas.

Segundo Iwakiri e Trianoski (2020), a diminuição das dimensões das partículas está diretamente associada ao aumento do consumo de adesivo para

aglutinação e interação entre as partículas dos painéis. Nesse contexto, à medida que as substituições de partículas de Pinus por partículas de PET aumentam, as características granulométricas das misturas são reduzidas e influenciadas pelas partículas de PET com tamanho inferior a 2 mm. Contudo, devido às propriedades distintas do PET em comparação com as propriedades da madeira, essas partículas proporcionaram uma maior interação com o adesivo PUR e um melhor “envelopamento” nas partículas, permitindo o preenchimento dos espaços vazios entre as partículas de madeira.

5.12 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica amplamente utilizada na caracterização de materiais devido à sua capacidade de fornecer imagens de alta resolução e informações detalhadas sobre a morfologia e a composição de superfícies e interfaces. No contexto dos painéis aglomerados de madeira, a MEV permite a análise minuciosa da estrutura interna do material, revelando a distribuição e o tamanho das partículas de madeira, bem como a qualidade das ligações entre as partículas e a resina aglomerante. Essas informações são essenciais para compreender o desempenho mecânico e a durabilidade dos painéis, possibilitando melhorias nos processos de fabricação e na qualidade final do produto.

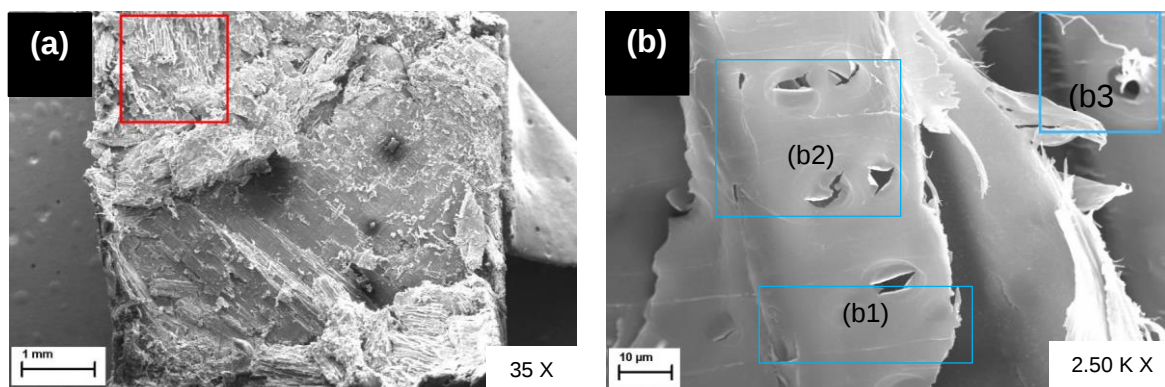
Para serem analisadas as imagens de MEV de forma mais detalhada, a marcação em vermelho Figura 1a, define o local onde a imagem seguinte Figura 1b, foi realizada. As seguintes marcações em azul, amarelo e verde, definem os demais detalhes referentes a madeira, as fraturas, o PUR e o PET, de acordo com cada análise realizada.

5.12.1 Análise dos painéis da Mistura 1 (75% Pinus sp , 15% PET e 10% PUR)

Como é possível evidenciar na figura 22(a) com resolução 35 X e 22(b) com resolução 2.50 K X a região em análise completamente revestida pelo PUR e PET, evidencia-se também existências de poros da madeira, alguns completamente preenchidos por PUR e PET (b1) sem sinais de ruptura e outros com sinais de rupturas do PUR e PET (b2). Uma análise muito interessante e muito característica do PET encontra-se no quadro b3 onde é possível evidenciar a parte rompida desse material

em forma de fiapos, muito característico do PET e muito diferente da madeira que fratura e produz pedaços pontiagudos.

Figura 22 – MEV da mistura com 75% Pinus, 15% PET e 10% de PUR; (a) imagem com a definição maior; (b) imagem com a definição menor

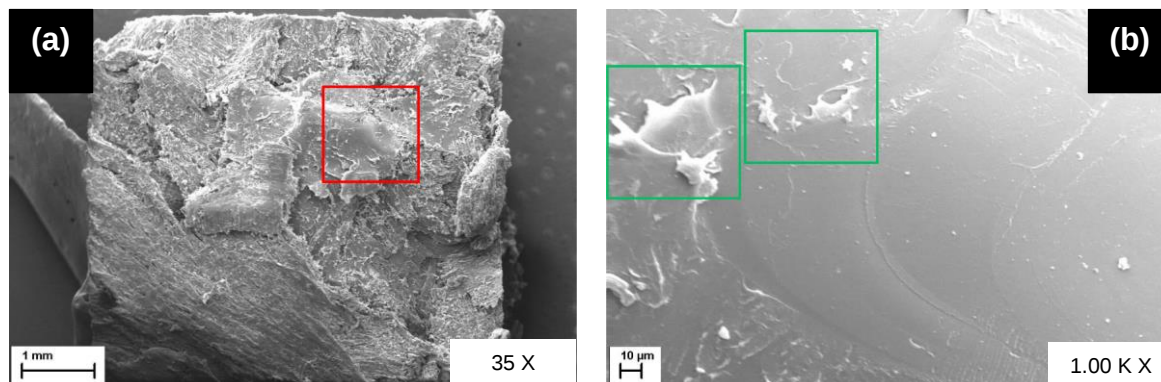


Fonte: Autoria própria.

5.12.2 Análise dos painéis da Mistura 2 (50% Pinus ssp, 40% PET e 10% PUR)

Considerando a MEV da Figura 23 que se constitui da análise de painéis com 50% de Pinus ssp, 15% de PET e 10% de PUR em comparação com a MEV dos painéis da M2 (50% Pinus ssp, 40% PET e 10% PUR) da Figura 20 é possível evidenciar que com o acréscimo de 25% de PET (40% no total) a região em análise apresenta-se completamente “envelopada” pelo PET e PUR, não sendo possível verificar nenhuma estrutura anatômica da madeira, tanto na figura 23 (a) com resolução de 35 X, quanto na figura 23 (b) com resolução de 1.00 K X. Uma análise muito relevante da região evidencia-se nas marcações destacadas em verde na Figura 23(b), onde é possível ver a parte rompida do material, com morfologia características de rupturas arredondadas de polímeros oriundas do PET e do PUR.

Figura 23 – MEV da mistura com 50% Pinus, 40% PET e 10% de PUR; (a) imagem com a definição maior; (b) imagem com a definição menor

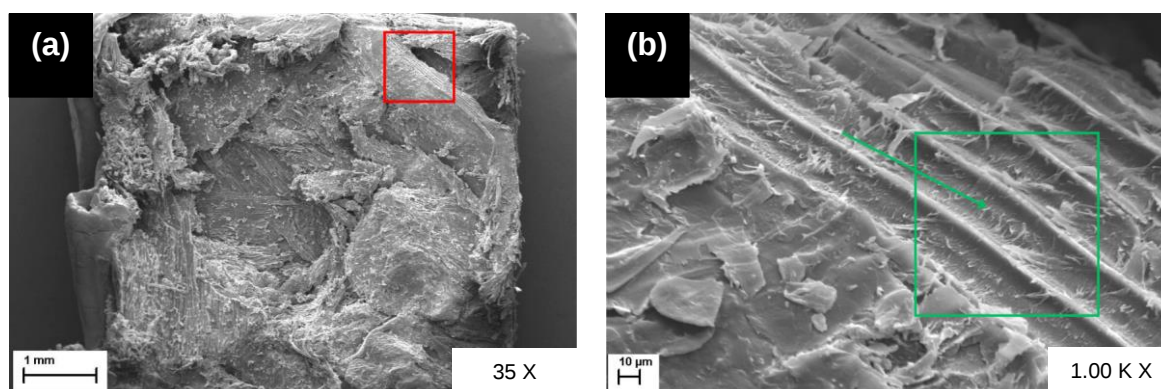


Fonte: Autoria própria.

5.12.3 Análise do painéis da Mistura 3 (65% Pinus sp, 30% PET e 5% PUR)

Na Figura 24 também é evidenciado o comportamento do PUR e PET atuando em consonância com a madeira, vale ressaltar que nos painéis da M3 (65% de Pinus ssp, 30% de PET e 5% de PUR) em comparação com as MEVs anteriores é possível verificar que também ocorreu um excelente recobrimento (“envelopamento”) do material madeira, pois, na figura 24b, com resolução de 1.00 K X, é possível observar na região destacada pela cor verde, estruturas anatômicas de vasos da madeira completamente preenchidos e revestidos por polímero (PET e PUR) evidenciando a eficiência dos 30% de PET e 10% de PUR no processo de produção dos painéis.

Figura 24 – MEV da mistura com 65% Pinus, 30% PET e 5% de PUR; (a) imagem com a definição maior; (b) imagem com a definição menor

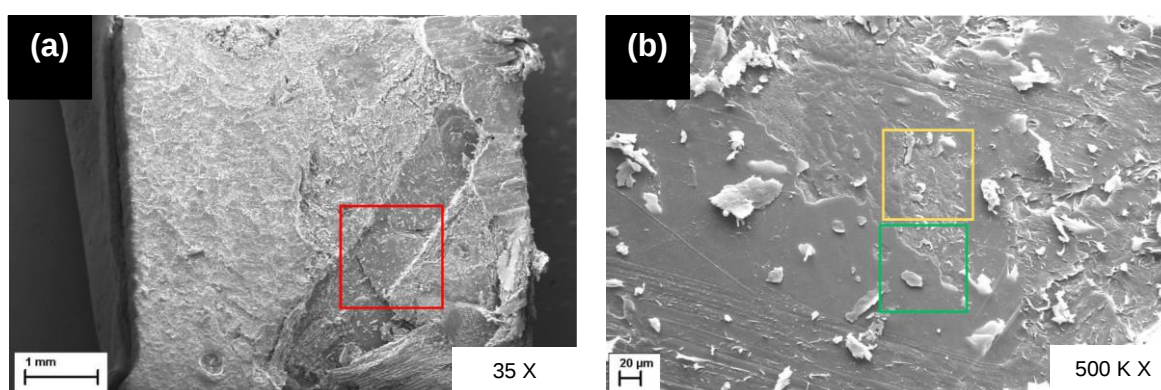


Fonte: Autoria própria.

5.12.4 Análise dos painéis da Mistura 4 (40% Pinus sp, 55% PET e 5% PUR)

Como é possível evidenciar na figura 25(a) com resolução 35 X e 25(b) com resolução 500 K X, esta MEV é mais uma evidência da eficiência do PET e do PUR no tocante ao bom revestimento da madeira, neste MEV os painéis foram produzidos com 40% de Pinus ssp, 55% de PET e 5% de PUR. Na região em destaque pelas cores verde e amarela é possível identificar, sobre a madeira completamente revestida pelo polímero (PET e PUR), algumas características marcantes do PET (região destacada em amarelo), ou seja, ruptura do PET com estruturas em forma de fiapos e, logo abaixo, em destaque na região em verde, uma evidência de ruptura característica de PUR, com a superfície apresentando-se com estruturas arredondadas e espalhando-se suavemente.

Figura 25 – MEV da mistura com 40% Pinus, 55% PET e 5% de PUR; (a) imagem com a definição maior; (b) imagem com a definição menor



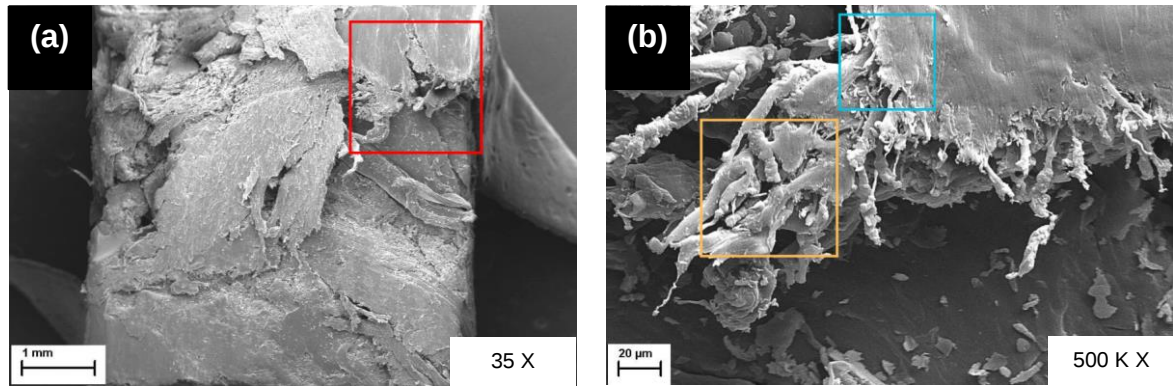
Fonte: Autoria própria.

5.12.5 MEV – Mistura 5 (50% Pinus sp, 50% PET e 0% PUR)

Neste MEV foi realizada análises nos painéis produzidos com 50% de Pinus ssp, 50% de PET e 0% de PUR. Em comparação com as demais MEVs é possível verificar que as imagens da Figura 26 apresentam em sua morfologia, aspectos superficiais bem diferentes das imagens referentes aos painéis com continham em suas misturas a presença do PUR, que propiciam às imagens superfícies morfológicas mais lisas, esse fato é muito bem verificado na MEV da Figura 26b, onde é possível verificar duas

regiões sob a influência do PET, a região em destaque com a cor azul evidencia alguns aspectos do substrato madeira sendo envolvido pelo PET e na região em destaque com a cor amarela observa-se uma das características de fratura do PET que é a presença de elementos fibrilares.

Figura 26 – MEV da mistura com 50% Pinus, 50% PET e 0% de PUR; (a) imagem com a definição maior; (b) imagem com a definição menor



Fonte: Autoria própria.

6 CONCLUSÃO

Com base na ABNT NBR 14810-2 (2018), ANSI A208.1 (2016) e considerando os resultados obtidos pelos ensaios realizados conclui-se que a substituição de partículas de Pinus por partículas de PET com adicional de PUR causou melhorias nas propriedades físicas e mecânicas analisadas, principalmente ao comparar com o painel de referência que continha apenas Pinus e PET em proporções iguais.

Considerando os resultados dos ensaios mencionados nas referências bibliográficas, tanto nacionais quanto internacionais, uma análise comparativa foi conduzida entre os painéis resultantes das misturas de 1 a 4 e aqueles provenientes da mistura 5. Dessa avaliação, surge uma conclusão significativa: o adesivo poliuretano (PUR) evidencia uma interação substancial com as partículas de Pinus e PET. Esse entendimento ressalta não apenas a eficácia do PUR na aglutinação das partículas, mas também infere sobre sua viabilidade como elemento aglutinante em composições que englobam tanto materiais tradicionais quanto reciclados.

De acordo com as exigências mínimas estabelecidas pela ABNT NBR 14810-2 (2018), constatou-se que os painéis provenientes das misturas 1 a 4 se enquadram nas classificações P2 e P3. Ainda com relação aos requisitos mínimos da norma brasileira, somente os painéis das misturas 3 e 4 se enquadram na classificação P4. Os painéis da mistura 5 não se enquadram em nenhuma classificação desta norma.

Com relação a norma ANSI A208.1 (2016), os painéis das misturas 1 a 4 se enquadram nas classificações H-1, H-2, M-0, M-1, M-S, M-2 e PUB; os painéis das misturas 1 a 3 se enquadram na classificação H-3; os painéis da mistura 3 se enquadram na classificação M-3i. Os painéis da mistura 5 não se enquadram em nenhuma classificação desta norma.

Com base na revisão bibliográfica, foi possível concluir que os painéis fabricados com 15% e 40% de PET, em combinação com 10% de adesivo PUR, apresentaram melhor adesão entre as partículas, isso pode ser verificado em função dos valores de resistência TP, A24H e I24H, consequentemente é possível inferir que ocorreu um bom “envelopamento” das partículas e um maior preenchimento de vazios no interior dos painéis em comparação com os painéis das misturas de referência (50% PET e 0% e 5% de PUR). No entanto, considerando tanto o desempenho das propriedades quanto a viabilidade econômica, os painéis mais vantajosos são aqueles das misturas 3 e 4.

Com a análise estatística é possível concluir que os resultados são significativos e que a metodologia adotada é compatível e coerente com as exigências das normas utilizadas.

Com as análises realizadas da MEV é possível concluir que tanto o PUR como a PET foram eficientes na produção dos painéis, contribuindo com o “envelopamento” das partículas de madeira e certamente contribuíram para o comportamento físico e mecânicos dos painéis.

Vale ressaltar que para continuidade da pesquisa seria interessante avaliar as misturas que propiciaram a produção de bons painéis, considerando-se a utilização de novos parâmetros para produção dois painéis, como por exemplo, variações de temperatura e pressão de prensagem.

Os resultados deste estudo destacam que a incorporação de resíduos da indústria moveleira com PET reciclado, aglutinados com adesivo PUR, na fabricação de painéis de partículas aglomeradas, resultou em propriedades físicas e mecânicas satisfatórias, atendendo aos requisitos de desempenho estabelecidos pelas normativas de referência. Esses painéis demonstram potencial para oferecer benefícios ambientais e econômicos significativos, ao mesmo tempo em que atendem às demandas da indústria e do mercado comercial.

REFERÊNCIAS

ABDUL KHALIL, H. P. S. *et al.* Development and material properties of new hybrid medium density fibreboard from empty fruit bunch and rubberwood. **Materials & Design**, Amsterdam, v. 31, n. 9, p. 4229-4236, 2010.

ABREU, A. S *et al.* Production of Wood-plastic Composites Using Recycled PET from Beverage Packaging. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 38-44, 2018.

ALLAF, R. M. **Preparation of sawdust-filled recycled-pet composites via solid state compounding**. [S. l.]: MDPI, 2020. DOI 10.3390/pr8010100. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/1/100>. Acesso em: 14 mar. 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D 3878 – 19**, 2019. Standard Terminology for Composite Materials. United States, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D 1554 – 10**, 2016. Standard Terminology Relating to Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. United States, 2016.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE – ANSI. **A208.1**: Particleboards. Gaithersburg, MD, 2016.

ARABI, M. *et al.* Interaction analysis between slenderness ratio and resin content on mechanical properties of particleboard. **Journal of Forestry Research**, Harbin, v. 22, p. 461–464, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11676-011-0188-2>. Acesso em: 14 mar. 2022.

ARAÚJO, C. K. C. *et al.* Caracterização mecânica de painéis particulados de média densidade produzidos a partir de resíduos de madeira. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 15, n. 1, p. 197-211, 2019.

ARAUJO, L. C. R. **Caracterização química e mecânica de poliuretanos elastoméricos baseados em materiais óleo químicos**. Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação do Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos - SP, 1992.

ARIANTI, I.; RAFANI, M. The Effect of Adding Plastic Bottle PET Waste in the Making of Sawdust Particleboard. **International Journal of Research Publication and Reviews**, [s. l.], v. 2, ed. 11, p. 737744, 2021. Disponível em: <http://repository.polnep.ac.id/xmlui/bitstream/handle/123456789/1979/The%20Effect%20of%20Adding%20Plastic%20Bottle%20PET%20Waste.pdf?sequence=1>. Acesso em: 14 mar. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÓVEIS – ABIMÓVEL. **Principais consumidores de madeira no Brasil**. Disponível em: <http://abimovel.com/>. Acesso em: 25 nov. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECÂNICA – ABIMCI. **Consumo de madeira sólida**. Disponível em: <https://abimci.com.br/>. Acesso em: 10 dez. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA – ABIPA. **Produção de painéis aglomerados no Brasil**. Disponível em: <https://www.abipa.com.br/>. Acesso em: 21 dez. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14810-1**: Painéis de partículas de média densidade: parte 1: terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

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, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9939**: Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 248**: Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO - ABIPLAST. Dados do Setor. **Produção de plástico no mundo**. 2021. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/dados-do-setor/>. Acesso em: 15 fev. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET – ABIPET. **Resina PET – História**. [S. l.], 2018. Disponível em: www.abipet.org.br. Acesso em: 3 mar. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET – ABIPET. **11º Censo da Reciclagem do PET no Brasil**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.abipet.org.br/>. Acesso em: 6 mar. 2023.

ASHBY, M.; JOHNSON, K. **Materiais e design**: A arte e a ciência da seleção de materiais no design de produtos. 3. ed. [S. l.]: Editora Butterworth-Heinemann, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário estatístico**, 2021: ano base 2020. Brasília, DF: ABRAF, 2021. 128 p. Disponível em: <https://abraf.org/>. Acesso em: 12 fev. 2023.

ATLAS DO PLÁSTICO: **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/202011/Atlas%20do%20PI%C3%A1stico%20%20vers%C3%A3o%20digital%20%2030%20de%20novembro%20de%202020.pdf>. Acesso em: 14 set. 2021.

AWAJA, F.; PAVEL, D. Recycling of PET. **European Polymer Journal**, [s. l.], v. 41, n. 7, p.1453-1477, jul. 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005>. Acesso em: 21 dez. 2022.

AZEVEDO, E. C. **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona**. 2009. 134 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, [s. l.], 2009.

BAHAROGLU, M. *et al.* The influence of moisture content of raw material on the physical and mechanical properties, surface roughness, wettability, and formaldehyde emission of particleboard composite. **Composites: Part B**. Reino Unido, 43, p. 2448-2451, 2012.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - BNDES. **Painéis de madeira reconstituída**. 2014. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/>. Acesso em: 17 nov. 2022.

BASBOGA, I. H.; TASDEMIR, C.; YUCE, O.; MENGELOGLU, F. Utilization of different size waste melamine impregnated paper as an adhesive in the manufacturing of particleboard. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 120, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103275>. Acesso em: 21 dez. 2022.

BERTOLINI, M. S. **Emprego de resíduos de Pinus oocarpa tratado com preservantes CCB na produção de chapas de partículas homogêneas utilizando resina poliuretano à base de mamona**. 2011. 128 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

BRITO, J. O.; BORTOLETTO JUNIOR, G.; MULINARI, D. R. Characterization of particleboards manufactured from coir pith and castor oil-based adhesive. **Materials Research**, São Carlos, v. 22 (3), 2019.

BRYDSON, J. A. **Materiais plásticos**. 7. ed. [S. l.]: Editora Butterworth-Heinemann, 1999.

BUZO, A. L. S. C. *et al.* Painéis de Pinus e bagaço de cana empregando-se dois adesivos para uso na construção civil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, e d. 4, p. 183-193, 2019. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212019000400350>. Acesso em: 21 dez. 2022.

CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R. Production and characterization of MDF using eucalyptus fiber and castor-oil based polyurethane resin. **Materials Research**, São Carlos, v. 7, n. 3, p. 421-425, 2004.

CARNEIRO, M. S., **Processo produtivo de resíduos em cinco madeiras no município de Paragominas-PA**. 2006. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso

(Graduação em Tecnologia Agroindustrial) - Universidade do Estado do Pará, Tecnologia Agroindustrial, Paragominas, 2006.

CASSILHA, A. C. *et al.* Indústria moveleira e resíduos sólidos: considerações para o equilíbrio ambiental. **Revista Educação & Tecnologia**, Curitiba, n. 8, p. 209-228, 2004.

CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CAZELLA, P. H. S. **Avaliação de painéis aglomerados homogêneos de pinus com incorporação de partículas de PET aglutinados com adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona**. 2022. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2022.

CARNEIRO, A. C. O. Propriedades físico-mecânicas da madeira de pinus oocarpa. **Madeas, ciência e tecnologia**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 459-472, 2017.

CARRADORI, E. G.; DOS SANTOS, C. A.; ROCCO LAHR, F. A. Process and quality control in the production of wood-based panels in Brazil. **Brazilian Journal of Wood Science**, [s. l.], v. 3, p. 60-71, 2012.

CERQUEIRA, P. H. A. de *et al.* Análise dos resíduos madeireiros gerados pelas serrarias do município de Eunápolis-BA. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 4, p. 506-510, 2012. FapUNIFESP (SciELO). DOI: 10.4322/loram.2012.051. Acesso em: 7 jan. 2023

CELESTINO, V. R. B. **Estudo do comportamento físico e mecânico de painéis aglomerados fabricados com partículas de Tectona grandis e Corymbia citriodora**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2020.

CHAMMA, P. V. C. **Produção de painéis a partir de resíduos sólidos para uso como elemento arquitetônico**. 2004. 138 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2004.

CHEN, G.; DING, T.; WU, Z. Preparação e propriedades de placas compostas de polietileno de alta densidade (HDPE)/PET, **Materiais**, [s. l.], v. 13, p. 982-998, 2020.

CHIPANSKI, E. R. **Proposição para melhoria do desempenho ambiental da indústria de aglomerado no Brasil**. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CHOTIKHUN, A. *et al.* **Some Properties of Wood Plastic Composites Made from Rubberwood, Recycled Plastic and Silica**. MDPI - FORESTS, [s. l.], 2022. DOI <https://doi.org/10.3390/f13030427>. Acesso em: 21 dez. 2022.

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Produção de chapas de partículas com resíduos de madeira *Cordia goeldiana*. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, p. 368- 377, 2015.

CRAVO, J. C. M. *et al.* Effect of density and resin on the mechanical, physical and thermal performance of particleboards based on cement packaging. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 151, p. 414-421, 2017.

DHARMARATNE, P.D. *et al.* Preliminary Investigation of the Suitability of Coir Fiber and Thermoplastic Waste as a Construction Material. **ENGINEER**, [s. l.], ed. 04, p. 65-74, 2021. DOI <http://doi.org/10.4038/engineer.v54i4.7471>. Acesso em: 21 dez. 2022.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretano à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada**. 2005. 116 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Curso de Engenharia de Matérias, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DOTUN, A. O.; ADESOJI, A. A.; OLUWATIMILEHIN, A. C. Physical and Mechanical Properties Evaluation of Particle Board Produced From Saw Dust and Plastic Waste. **International Journal of Engineering Research in Africa**, [s. l.], v. 40, p. 1-8, 2018. DOI 10.4028/www.scientific.net/JERA.40.1. Acesso em: 21 dez. 2022.

EBEWELE, R. O. **Polymer science and technology**. Boca Raton, New York: CRC Press, 2000. p. 504.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Embrapa Florestas. **Sistema de Produção**, v. 2, n. 5, 2014. Disponível em: https://www.spo.nptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaolf6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column1&p_p_col_count=1&p_r_p_76293187_sistemaProducaold=3715&p_r_p_-996514994_topicold=3229. Acesso em: 23 jan. 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Embrapa Florestas. **Consumo e plantio de florestas**, v. 2, n. 5, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/>. Acesso em: 23 jan. 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Produção e consumo de espécies de madeira pinus no Brasil**, 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/>. Acesso em: 7 jan. 2023.

FARIA, D. L. *et al.* Emprego de maravalhas de Eucalyptus na produção de painéis: uma alternativa para aproveitamento dos resíduos oriundos da usinagem da madeira. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v. 7, n. 3, p. 1101-1109, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.34062/afs.v7i3.9895>. Acesso em: 21 dez. 2022.

FEITOSA, B. C. **Aproveitamento dos resíduos de madeira no Pará 2008**. Disponível em:

<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/32733/JOSE%20LAZARO%20PINHEIRO%20DA%20SILVA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 fev. 2023.

FERREIRA, E.S.; KNUTH. A. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados de *Tectonagrandis* produzidos com adição de diferentes teores de PET. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA – CBCTEM*, 4., 2019, Santarém. **Anais** [...]. Santarém: CBCTEM, 2019.

FIGUEIREDO, M. A. F. Caracterização tecnológica de *Pinus oocarpa* cultivado em sistema agrossilvipastoril. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 108, p. 221-231, 2015.

FIORELLI, J. *et al.* Painéis de partículas monocamadas fabricadas com resíduo de madeira e fibra de verde. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 43, p. 175-182, 2015.

FINOTTI, A. R., *et al.* Uso energético de resíduos de madeira na cadeia produtiva de madeira/móveis e possibilidades de geração de créditos de carbono. *In: Schneider, V. E., Nehme, M. C., Ben. F. (org.). Polo Moveleiro da Serra Gaúcha - Sistemas de gerenciamento ambiental na indústria moveleira*. Educs, 2006. p. 191-230.

FIORELLI, J. *et al.* Desenvolvimento e caracterização de painéis de partículas com casca de amendoim e resina poliuretano de mamona. *In: LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos*. São Carlos: [s. n.], 2013. p. 293-308. ISBN 978-85-8023-019-2.

FONTES, P. J. P. **Autossuficiência Energética em Serraria de Pinus e Aproveitamento dos Resíduos**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1994.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE – WWF. **Plastic and Waste Production Around the World**. 2021. Disponível: <https://www.wwf.org.br/>. Acesso em: 19 fev. 2023.

FONSECA, T. G; ALMEIDA, Y. M. B; VINHAS, G. M. Reciclagem química do PET pós-consumo: caracterização estrutural do ácido tereftálico e efeito da hidrólise alcalina em baixa temperatura. **Polímeros**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 5, p. 567- 571, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1583>. Acesso em: 21 dez. 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO; FORESTRY DEPARTMENT. **Global forest products: facts and figures**. Rome: FAO, 2016. Disponível em: <https://www.fao.org/publications/card/en/c/I7034EN/>. Acesso em: 21 dez. 2022.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 463p (Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113).

FRIEDRICH, D. Additive Manufacturing of Post-process Thermoformed Wood-plastic Composite Cladding. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 139, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104322>. Acesso em: 21 dez. 2022.

GACHTER, R.; MULLER, G. **Plásticos: materiais de termo formação, processamento e caracterização**. 2ª ed, 2013.

GALVÃO, A. P. M. Propriedade física e químicas da madeira *Pinus oocarpa* de uma plantação florestal no Brasil. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, n. 2, p. 56, 2016.

GILIO, C. G. **Avaliação de painéis de maravalhas homogêneas empregando-se madeira de hevea brasiliensis e tectona grandis, aglutinadas com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona**. 2020. 139 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2020.

GONÇALVES, F. G. *et al.* Densitometria de raios x na avaliação da densidade em painéis de partículas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 3, p.1151- 1162, 2018.

GOMES J. I; SAMPAIO S. S. **Aproveitamento de resíduos de Madeira em Três Empresas Madeireiras do Estado do Pará**. Belém: Embrapa, 2004. (Comunicado técnico, n. 102).

GONG, M.; LAM, F.; CHENG, W.; WONG, E. The effects of particle mixture content and resin on the physical and mechanical properties of particleboard. **Journal of Wood Science**, v. 61, p. 32-38, 2015.

GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. **Painéis de madeira de eucalipto: estudo de caso de espécies e procedências**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

GUPTA, A. K., VERMA, S. K., & KUMAR, R. **Wood-Based Composites**. In M. C. Barbu, R. Reh, & M. Irle (Eds.), **Wood-Based Composites** (pp. 1-43). 2015. IGI Global. Disponível em: www.igi-global.com/chapter/wood-basedcomposites/84188?camid=4v1.

HERNÁNDEZ, R. E *et al.* Manufacture of Agglomerated Panels Using PET Waste as a Raw Material. **Materials Research**, [s. l.], 2020, v. 23, p. 200-219.

HILLIG, E. **Qualidade das Chapas Aglomeradas Estruturais Fabricadas com Madeiras de Pinus, Eucalipto e Acácia Negra, puras ou misturadas coladas com Tanino-Formaldeído**. 2000. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2000.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório Anual**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2023.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Programa setorial da qualidade de painéis de madeira MDF e MDP**. 14. ed. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em:

<https://iba.org/datafiles/publicacoes/outros/informativoxiv.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2023.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Painéis de madeira**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <https://iba.org/mdp-medium-density-particleboard-paineis-departiculas-de-media-densidade>. Acesso em: 15 jan. 2023. 104

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Industrial Anual – Produção Física: Unidades Locais 2018-2020**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 19 nov. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE QUALIDADE DE PRODUTIVIDADE - IBQP. Disponível em: www.ibpq.org.br. Acesso em: 27 fev. 2013.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Informações sobre madeiras**. Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeir7. Acesso em: 10 fev. 2023.

IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R. **Painéis de madeira reconstituída**. 2. ed. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 2020. 259 p.

IWAKIRI, S. *et al.* Use of residues of forestry exploration of Pinus taeda for particleboard manufacture. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, p. 1-8, 2017.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 2005.

IWAKIRI, S. *et al.* Resíduos de serrarias na produção de painéis da madeira aglomerada de eucalipto. **Scientia Agrária**, [s. l.], v.1, n.1-2, p. 23-28, 2000. Editora UFPR.

JESUS, J. M. H. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. 2000. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2000.

JUNXIONG, H.; ZHINAN, W.; LIPING, L.; CHUIGEN, G. Value-added Utilization of Corn cob Hydrolysis Residues: Preparation of Reinforced Wood-plastic Composite With Highly Water Resistance and Decay Resistance. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 195, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116497> Acesso em: 21 dez. 2022.

KLÍMEK, P. *et al.* Utilization of Air-plasma Treated Waste Polyethylene Terephthalate Particles as a Raw Material for Particleboard Production. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 90, p. 188-194, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.019>. Acesso em: 21 dez. 2022.

KOLLMANN, F.P.; KUENZI, E.W. STAMM. J. Principles of wood science and technology. **Wood based materials: properties of particleboard. nail-holding and screw holding ability**. New York, 1975. p. 523-529.

LIU, J.; MA, X.; ZHANG, Y. Preparation and characterization of a formaldehyde-free soy-based adhesive for plywood. **Polymers**, v. 11, p. 975-980, 2019.

LOPEZ, Y. M. *et al.* 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, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118723>. Acesso em: 21 dez. 2022.

LOPEZ, Y. M. *et al.* 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, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118723>. Acesso em: 21 dez. 2022.

LOPEZ, Y. M. *et al.* Wood particleboards reinforced with thermoplastics to improve thickness swelling and mechanical properties. **Cerne**, Lavras, v. 24, n. 4, p. 369-378, 2018. DOI: 10.1590/01047760201824042582. Acesso em: 21 dez. 2022.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacture**. San Francisco: M. Freeman, 1993. v. 2. 689 p.

MALONEY, T.M. Terminology and products definitions - a suggested approach to uniformity world wide. *In*: INTERNATIONAL UNION OF FORESTER SEARCH ORGANIZATION WORLD CONGRESS, 18., 1986, Ljubljana: Yugoslavia. **Proceedings** [...]. [S. l.]: IUFRO World Congress Organizing Committee, 1986.

MALONEY, T.M. **Modern particleboard & dryprocess fiberboard manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman Publications, 1977. 672 p.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. 2 ed. [S. l.]: Editora Edgard Blucher, 2000.

MARINHO, N. P. *et al.* Caracterização Física e Térmica de Compósito de Poliuretano Derivado de Óleo de Mamona Associado com Partículas de Bambu. **Polímeros**, Rio de Janeiro, v. 23, n 2, pp. 201205, 2013.

MARRA, A. A. **Technology of wood bonding**. New York: V. Nostrand Reinhold, 1992. 453 p.

MARTON, A. **Confecção e avaliação de chapas de madeira aglomerada com aproveitamento de resíduos de marcenaria industrial**. 2014. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2014.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B. **Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 27, p. 121-156, 2008.

MIAO, P.; LIU, M.; WANG, C.; CHENG, J. Influence of PET bottle flakes on the properties of wood-plastic composites. **Journal of Materials Science Research**, [s. l.], v. 9, p. 10-19, 2020.

MINILLO, L. Q. **Aproveitamento de resíduo das indústrias de celulose e sucroalcooleira para produção de painéis aglomerados**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, SP, 2016.

MIYAMOTO, K.; NAKAHARA, S.; SUZUKI, S. Effect of particle shape on linear expansion of particleboard. **Journal of Wood Science**, Tokyo, p. 185–190, 2002.

MOREIRA, R.C. *et al.* Incorporação de garrafas PET como matéria-prima na produção de painéis de partículas: um estudo sobre propriedades físicas e mecânicas. **Pesquisa de Materiais**, v. 23, p. 14-20, 2020

MORCHID, E. F. *et al.* Thermal and Mechanical Properties of a High-density Polyethylene (HDPE) Composite Reinforced With Wood Flour. **Materials today: Proceedings**, v. 2, p. 3602-3608, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.394>. Acesso em: 21 dez. 2022.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard**: vol I: materials. London: Southern Illinois University Press, 1974. 244 p.

NASCIMENTO, M. F. *et al.* Painéis de partículas homogêneas fabricados com resíduos lignocelulósicos e resina alternativa para aplicação em pisos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, p. 1-6, 2016.

NASCIMENTO, M. F. do; LAHR, F. A. R; CHRISTOFORO, A. L. **Painéis de partículas de média densidade (MDP): fabricação e caracterização**. São Carlos: EESC, 2015. p. 1-45.

NOGUEIRA, L. C.; SERRANO, L.; MENDES, L. M. Efeito da espécie e densidade da madeira nas propriedades mecânicas e físicas de painéis de fibra de madeira de média densidade (MDF). *Maderas*. **Ciencia y tecnologia**, [s. l.], v. 23, p. 43-54, 2021.

OCEAN CONSERVANCY. **Environmental and oceanic impact of Polymer worldwide**. 2022. Disponível em: <https://oceanconservancy.org/>. Acesso em: 15 jan. 2023.

OLIVEIRA, S. L.; PEREIRA, T. V. T.; MENDES, L. M.; MENDES, R. F. Laminar Inclusion in Sugarcane Bagasse Particleboard. **Cerne**, Lavras, v. 23, n. 2, p. 153-160, 2017.

PAES, J. B. *et al.* Qualidade de chapas de partículas de *Pinus elliottii* coladas com resina poliuretano sob diferentes combinações de pressão e temperatura. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 551-558, 2011.

PEDZIK, M.; JANISZEWSKA, D.; ROGOZINSKI, T. Alternative lignocellulosic raw materials in particleboard production: A review. **Industrial Crops and Products**, v. 174, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114162>. Acesso em: 21 dez. 2022.

PIZZI, A. **Advanced wood adhesives technology**. New York: Marcel Dekker. 1994, 297 p.

PRADO, R.A.; OLIVEIRA, A.C.; CUNHA, A.B.; LAHR, F.A.R. Propriedades mecânicas de painéis de partículas fabricadas a partir de garrafas recicladas de tereftalato de polietileno (PET) e partículas de madeira. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 71, p. 55-60, 2021

QIANG, T; *et al.* Life Cycle Assessment on Polylactide-based Wood Plastic Composites Toughened With Polyhydroxyalkanoates. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 66, p. 139-145, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.074>. Acesso em: 21 dez. 2022.

RAHMAN, K. S. *et al.* Flat-pressed wood plastic composites from sawdust and recycled polyethylene terephthalate (PET): physical and mechanical properties. **Springer Open**, [s. l.], n. 2, p. 629, 2013. DOI: 10.1186/2193-1801-2-629. Acesso em: 21 dez. 2022.

RAHMAN, K. S. *et al.* Properties of flat-pressed wood plastic composites as a function of particle size and mixing ratio. **Journal of Wood Science**, [s. l.], p. 279-286, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-018-1702-3>. Acesso em: 21 dez. 2022.

REVISTA DA MADEIRA - REMADE. **Mercado de produtos madeireiros certificados na indústria de painéis**. 140. ed. [S. l.], 2014. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1779&subject=R_M_Digital&title=Revista%20da%20Madeira%20Digital. Acesso em: 7 jan. 2023.

ROCHA, B. B. **Aproveitamento de resíduos de madeira e bagaço de cana-de-açúcar na produção e avaliação de painéis aglomerados**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2016.

RODRIGUES, F. R. **Estudo da viabilidade do uso de resíduo de poliestireno e poliuretano de óleo de mamona na produção de painéis aglomerados homogêneos de pinus e eucalipto**. 2022. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2022.

RODRIGUES, P. F.; RIBEIRO, T. P.; NEVES JUNIOR, A. Caracterização Mecânica de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de Politereftalato de Etileno Espiraladas. **E&S – Engineering and Science**, Cuiaba, v. 6, 2017. DOI <http://dx.doi.org/10.18607/ES20176068>. Acesso em: 7 jan. 2023

SAM-BREW, S.; SMITH, G. D. Flax shive and hemp hurd residues as alternative raw material for particleboard production. **Bioresources**, Raleigh, v. 12, n. 3, p. 5715-5735, 2017.

SANTOS, R. C. *et al.* Utilização de resíduos da madeira de candeia (*Eremanthus erythropappus* Macleish) na produção de painéis aglomerados com adição do PET. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 149-158, 2011.

SILVA, V. U. da. **Viabilidade técnica do reaproveitamento da maravalha de forma integral na produção de painéis de partículas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

SILVA, S. A. M. *et al.* Avaliação da densidade aparente de chapas de madeira aglomerada produzidas com partículas de madeira tropical e poliuretano derivado de óleo de mamona. In: LAHR, Francisco Antonio Rocco; CHRISTOFORO, André Luís (Orgs.). **Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos**. São Carlos: Ed. EESC/USP, 2013. p. 95-114.

SILVA, V. U. *et al.* Circular vs. linear economy of building materials: A case study for particleboards made of recycled wood and biopolymer vs. conventional particleboards. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 285, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122906>. Acesso em: 7 jan. 2023

SILVA, F. A *et al.* Utilização de garrafas PET como matéria-prima na produção de painéis aglomerados. **Maderas: Ciencia y Tecnología**. 2021, v. 23, p. 607-618.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS - SNIF. **Cadeia Produtiva**. Brasília, DF: SNIF, 2020. Disponível em: <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/cadeia-produtiva>. Acesso em: 21 dez. 2022.

SOUZA, M. V. **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) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2022.

STARK, N.M.; CAI, Z. Wood-based composite materials: panel products, glued laminated timber, structural composite lumber, and wood-non wood composites. In: **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021. 543 p. (General Technical Report FPL-GTR-282).

SUGAHARA, E. S. **Painéis aglomerados produzidos com partículas de eucalipto e bagaço de cana, com adesivos ureia formaldeído e poliuretano à base de mamona**. 2018. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira, 2018.

SUGAHARA, E. S. *et al.* High-density Particleboard Made from Agro-industrial Waste and Different Adhesives. **Bioresources**, [s. l.], p. 5162-5170, 2019. DOI: 10.15376/biores.14.3.5162-5170. Acesso em: 7 jan. 2023

TCHARKHTCHI, A. Life Cycle Assessment of Polymers: A Review. **Polymer Degradation and Stability**, [s. l.], v. 162, p. 168-188, 2019.

TRIANOSKI, R. *et al.* Avaliação das propriedades de painéis compensados de Melia azedarach L. produzidos com diferentes gramaturas e tempos de prensagem. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 759-768, 2015.

TRIANOSKI, R. **Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, 2010.

TREVISAN, C. G. **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. 18-84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, SP.

ZOCH, V. P. **Produção e propriedades de compósitos madeira-plástico utilizando resíduos minimamente processados.** 2013. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.