UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Bauru

Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design

PPGARQ

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ARQUITETURA, ARTES, COMUNICAÇÃO E DESIGN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

VITÓRIA BORTOLOTTI DE LA LIBERA

PAINÉIS AGLOMERADOS HOMOGÊNEOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE MÓVEIS PÓS-CONSUMO

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Augusto Mello da Silva

BAURU - 2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Bauru

Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design

PPGARQ

VITÓRIA BORTOLOTTI DE LA LIBERA

PAINÉIS AGLOMERADOS HOMOGÊNEOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE MÓVEIS PÓS-CONSUMO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, da Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", campus de Bauru, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.
Linha de Pesquisa: Planejamento e Avaliação do Ambiente Construído.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Augusto Mello da Silva

BAURU
2025

IMPACTO POTENCIAL DESSA PESQUISA

Esta pesquisa tem como objetivo utilizar resíduos de móveis pós-consumo, mais especificamente os painéis do tipo MDP, juntamente com polietileno tereftalato (PET) e breu, para fabricação de painéis aglomerados homogêneos, substituindo a madeira convencional e o adesivo tradicionalmente utilizados, a ureia-formaldeído e *Pinus*, sendo a primeira conhecida por causar danos à saúde e ao meio ambiente, substituindo-os pelas partículas obtidas através da desagregação dos painéis pós-consumo e a resina biopolimérica poliuretana à base de óleo de mamona (PUR). Este trabalho está de acordo com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 12, que trata sobre o consumo consciente e a produção sustentável, incentivando a reutilização de materiais e a redução de resíduos. Além disso, a pesquisa se alinha também com o ODS 3, que visa a saúde e o bem-estar, e com o ODS 13, que combate o aquecimento global através da redução da emissão de substâncias nocivas. Por fim, os resultados da pesquisa desenvolvida demonstram a necessidade da indústria de materiais de construção de adotar métodos e técnicas mais inovadores e sustentáveis pelo bem desta e das próximas gerações.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research aims to use post-consumer furniture waste, more specifically MDP type panels, together with polyethylene terephthalate (PET) and pitch, to manufacture homogeneous particleboard panels, replacing conventional wood and the traditionally used adhesive, urea. -formaldehyde and Pine, the first being known to cause damage to health and the environment, replacing them with particles obtained through the disintegration of post-consumer panels and polyurethane resin based on castor oil (PUR). This work is in line with Sustainable Development Goal (SDG) 12, which deals with conscious consumption and sustainable production, encouraging the reuse of materials and waste reduction. Furthermore, the research also aligns with SDG 3, which aims at health and well-being, and with SDG 13, which combats global warming by reducing the emission of harmful substances. Finally, the results of the research developed demonstrate the need for the construction materials industry to adopt more innovative and sustainable methods and techniques for the sake of this and future generations.

Libera, Vitória Bortolotti de La.
Painéis aglomerados homogêneos produzidos com resíduos de móveis pós-consumo / Vitória Bortolotti de La Libera. – Bauru, 2025
145 f. : il.

Dissertação (Mestrado)– Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design, Bauru
Orientador: Sergio Augusto Mello da Silva

1. Mobiliário. 2. Reciclagem. 3. Arquitetura. 4. Sustentabilidade. 3. Reuso. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design. II. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE VITÓRIA BORTOLOTTI DE LA LIBERA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO, DA FACULDADE DE ARQUITETURA, ARTES, COMUNICAÇÃO E DESIGN - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 24 dias do mês de fevereiro do ano de 2025, às 14h30min, no(a) meet.google.com/nvd-sxvk-yxm, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de VITÓRIA BORTOLOTTI DE LA LIBERA, intitulada **Painéis Aglomerados Homogêneos Produzidos com Resíduos de Móveis Pós-consumo**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Professor Associado SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, Professora Doutora MARIA SOLANGE GURGEL DE CASTRO FONTES (Participação Virtual) do(a) Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo / Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design de Bauru, Professora Doutora EDNA MOURA PINTO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Arquitetura / Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: **APROVADA**. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

gov.br Documento assinado digitalmente
SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA
Data: 24/02/2025 16:42:32 -0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor Associado SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais, Aparecida de Fátima e Antônio Sérgio, e a Juliana, pelo apoio incondicional durante toda essa trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe Aparecida de Fátima Bortolotti de La Libera, sem ela não teria conseguido chegar tão longe, ao meu pai Antônio Sérgio de La Libera, que sempre me apoiou e incentivou, através deles pude sonhar e tornar meus sonhos reais, essa conquista também é deles.

Ao meu orientador Sergio Augusto Mello da Silva, por todos os ensinamentos transmitidos, cuidado e atenção no decorrer da minha trajetória.

Ao meu amigo Matheus pela confiança depositada em mim, afinal foi ele quem me introduziu nessa vida acadêmica e suportou meus momentos mais delicados.

Aos meus mentores e companheiros de pesquisa Antônio e Marjorie, por terem me iniciado na vivência laboratorial, compartilhado as práticas e me auxiliando durante os desafios. Guardarei para sempre nossos momentos. E aos demais companheiros de jornada acadêmica: Denise, Felipe, Lucas, Rodrigo, Bruna e Ananda.

A minha amiga Thais, que nunca me deixa desanimar e está sempre me incentivando a sonhar cada vez mais alto. Também a Iasmin e a Giovanna, que mesmo me ausentando nunca deixaram nossa amizade e carinho diminuir.

Aos professores do programa de pós-graduação FAAC – UNESP, pelo conhecimento transmitido, pela vivência e pelos concelhos valiosos.

Aos técnicos do laboratório de engenharia civil de Ilha Solteira Flávio e Gilson, que foram de grande valia. Também ao técnico Elton do laboratório do Departamento de Física e Química pelos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). E ao funcionário Luiz da Marcenaria da UNESP, por todos os serviços realizados.

À Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" UNESP, tanto ao campus de Bauru, Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design - FAAC, quanto ao campus de Ilha Solteira Faculdade de Engenharia – FEIS.

Ao grupo de pesquisa Produtos Derivados de Madeira – PDM e Materiais Alternativos de Construção – MAC, o qual faço parte.

Ao Departamento de Pós-graduação da FAAC e a todos os servidores.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado, importante auxílio para o desenvolvimento da pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Ao longo da história da sociedade, são verificadas frequentes transformações, e os padrões de consumo também têm se tornado cada vez mais mutáveis. À medida que novas tendências substituem as anteriores, objetos de desejo acabam sendo descartados e atualizados. No contexto da arquitetura, por exemplo, as mudanças nos mobiliários são intensas, resultando em descartes frequentes. Esse cenário apresenta desafios significativos para a sociedade contemporânea, especialmente nas áreas ambiental, econômica e social. Uma alternativa necessária para enfrentar essa problemática é o reaproveitamento de resíduos de madeira, frequentemente acumulados em lixões e aterros sanitários, causando prejuízos ao meio ambiente. Este estudo tem como objetivo demonstrar a viabilidade da reutilização de resíduos de móveis fabricados com painéis MDP para a produção de novos painéis aglomerados. Além disso, propõe a substituição do adesivo ureia-formaldeído (UF) pela Resina Poliuretana derivada do óleo de Mamona (PUR), visando melhorar as propriedades do novo painel. As partículas de madeira utilizadas foram obtidas a partir da desagregação de móveis fabricados com painéis MDP, doados pela empresa Newdrop, localizada em Lins, São Paulo. Após a desagregação, as partículas foram preparadas para reaproveitamento, estabilizadas com umidade em torno de 3% e classificadas entre 2 e 6 mm. Com essas partículas preparadas, foram propostas sete misturas, prevendo o uso de diferentes percentuais de partículas de painéis pós-consumo e dos aditivos (PET e breu) aglutinados com 10% do adesivo PUR. A prensagem dos painéis foi realizada sob pressão de 5 MPa, densidade nominal de 0,5 g/cm³, temperatura de 160°C e tempo de prensagem de 10 minutos. Os ensaios para determinação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis foram conduzidos conforme a norma ABNT NBR 14810-2. Os resultados obtidos demonstraram a eficiência dos aditivos em conjunto com o adesivo na produção dos painéis, indicando uma alternativa viável para aplicação industrial.

Palavras-chave: Mobiliário; Reciclagem; Arquitetura; Sustentabilidade; Reuso.

ABSTRACT

Throughout the history of society, frequent transformations have been observed, and consumption patterns have also become increasingly mutable. As new trends replace previous ones, objects of desire are often discarded and updated. In the context of architecture, for example, changes in furniture design are intense, leading to frequent disposals. This scenario presents significant challenges for contemporary society, particularly in the environmental, economic, and social spheres. A necessary alternative to address this issue is the reuse of wood waste, which often accumulates in landfills and dumping sites, causing environmental damage. This study aims to demonstrate the feasibility of reusing furniture waste made from MDP panels to produce new particleboards. Additionally, it proposes the substitution of the urea-formaldehyde (UF) adhesive with PUR, PET, and rosin to enhance the properties of the new panel. The wood shavings used were obtained from the disassembly of furniture made from MDP panels, donated by the company Newdrop, located in Lins, São Paulo. After disassembly, the shavings were prepared for reuse, stabilized with a moisture content of approximately 3%, and classified into sizes between 2 and 6 mm. With these prepared shavings, seven mixtures were proposed, involving different percentages of Pinus shavings and the additives PET and rosin, bonded with 10% PUR adhesive. The panels were pressed at 5 MPa, with a nominal density of 0.5 g/cm³, a temperature of 160°C, and a pressing time of 10 minutes. Tests to determine the physical and mechanical properties of the panels were conducted in accordance with the ABNT NBR 14810-2 standard. The results demonstrated the efficiency of the additives combined with the adhesive in the production of the panels, indicating a viable alternative for industrial applications.

Keywords: Furniture; Recycling; Architecture; Sustainability; Reuse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Maiores Florestas do Mundo por Milhões de Hectares 23
Figura 2 – Divisão do Setor Empresarial que Trabalha com Madeira no Brasil 26
Figura 3 - Representação dos compostos de madeira.....30
Figura 4 - Empresas de painéis MDF, MDP e Chapa de Fibra no Brasil 31
Figura 5 - Crescimento das vendas de painéis MDF e MDP.....32
Figura 6 - Fluxograma da fabricação dos painéis aglomerados.....34
Figura 7 - Distribuição das partículas dos painéis aglomerados 35
Figura 8 - Estimativa da produção global de plástico em milhões de toneladas 42
Figura 9 - Pós-consumo de PET no Brasil 46
Figura 10 - Fases da obtenção do breu 52
Figura 11 - Fluxograma do Processo de Necessidade até o Descarte 55
Figura 12 - As possíveis ações do consumidor para descarte de produtos 56
Figura 13 – Fluxograma da pesquisa.....62
Figura 14 – (a) escrivaninhas no depósito e (b) os painéis separados 63
Figura 15 – Adesivo Resina Poliuretana à base de Óleo de Mamona 64
Figura 16 – Partículas de PET 65
Figura 17 – Breu Colofônia.....66
Figura 18 - Painel produzido com 100% de partículas pós-consumo e 10% de PUR 67
Figura 19 – Misturas para produção dos painéis.....69
Figura 20 – Painéis pós-consumo condicionados no tambor com água 70
Figura 21 – (a) peneiramento forçado e (b) partículas de MDP passantes 71
Figura 22 - Determinação da composição granulométrica 73
Figura 23 – Secagem ao ar livre (a) partículas pós-consumo e (b) partículas de PET 74
Figura 24 - Balança Determinadora de Umidade 75
Figura 25 - Ensaio do balão volumétrico 76
Figura 26 - Calibração do picnômetro ao fluido.....77
Figura 27 - (a) homogeneização manual (b) homogeneização em tambor giratório .80
Figura 28 - (a) painel na prensa, (b) painel pronto para prensagem, (c) painel prensado 81

Figura 29 – (a) 100% MDP, (b) 70/30 MDP/PET, (c) 85/15 MDP/Breu, (d) 40/30/30 MDP/PET/Breu 82
Figura 30 - aferição da espessura e das arestas dos corpos de prova 83
Figura 31 - (a) cps úmidos, (b) estufa, (c) cps secos 85
Figura 32 – (a) cps antes, (b) durante o ensaio, (c) depois do ensaio 86
Figura 33 – Ensaio nos: (a) painel pós-consumo (MDP), (b) mistura com PET, (c) mistura com breu 88
Figura 34 – (a) morsa e (b) lixamento manual 89
Figura 35 - Preparação do suporte metálico 90
Figura 36 - Cola utilizada para colar o cp ao suporte metálico 90
Figura 37 - (a) máquina universal de ensaios EMIC, (b) cp rompido de MDP, (c) cp rompido - mistura com PET, (d) cp rompido - mistura com breu 91
Figura 38 - Densidade média dos painéis 102
Figura 39 - Inchamento e absorção médios em 24 horas dos painéis 104
Figura 40 - Umidade média dos painéis 106
Figura 41 – Umidade, Inchamento e Absorção dos painéis 108
Figura 42 – Módulo de Ruptura médio dos painéis 112
Figura 43 – Módulo de Elasticidade médio dos painéis 114
Figura 44 – Resistência à Tração Perpendicular média dos painéis 116
Figura 45 - Imagens de MEV painéis pós-consumo 119
Figura 46 - Imagens de MEV mistura 100%MDP e 10%PUR 120
Figura 47 - Imagens de MEV misturas com PET 121
Figura 48 - Imagens de MEV mistura com breu 123
Figura 49 - Imagens de MEV mistura com PET e breu 125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores mínimos das propriedades físicas e mecânicas 36
Tabela 2 - Produção, incineração e reciclagem de plástico no mundo 44
Tabela 3 - Propriedades físicas e mecânicas do PET 45
Tabela 4 - Misturas propostas para confecção dos painéis 68
Tabela 5 – Massa das misturas propostas para os painéis 79
Tabela 6 - Teor de umidade das partículas pós-consumo e de PET 93
Tabela 7 - Massa específica das partículas e das misturas 94
Tabela 8 - Índice de compactação das misturas 95
Tabela 9 - Composição granulométrica 100% MDP 96
Tabela 10 - Composição granulométrica 100% PET 96
Tabela 11 - Composição granulométrica 85% MDP e 15% PET 97
Tabela 12 - Composição granulométrica 70% MDP 30% PET 97
Tabela 13 - Composição granulométrica 70% MDP, 15% PET e 15% BREU 98
Tabela 14 - Composição granulométrica 40% MDP, 30% PET e 30% BREU 98
Tabela 15 – Classificação normativa de painéis aglomerados com relação a densidade 99
Tabela 16 – Ensaios físicos e classificação dos painéis das literaturas de comparação 100
Tabela 17 – Resultado dos ensaios físicos e classificação dos painéis 100
Tabela 18 – Ensaios físicos e classificação dos painéis das literaturas 110
Tabela 19 – Resultado dos ensaios mecânicos 110
Tabela 20 – Resultado dos ensaios físicos e mecânicos dos painéis 127
Tabela 21 - Parâmetros físicos e mecânicos da ABNT NBR 14810-2 (2018) 128

LISTA DE ABREVIATURAS

ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente.

ABIMÓVEL – Associação Brasileira das Indústrias do Mobiliário.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

APRE – Associação Paranaense de Empresas de Base Florestal**.**

ASTM – *American Society for Testing and Materials.*

CP – Corpo de prova.

FAO – *Food and Agriculture Organization.*

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores.

IDH – Índice de Desenvolvimento Humano.

IMARC – *International Market Analysis Research and Consulting Group.*

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura.

MDF – Medium Density Fiberboard ou Painel de Fibras de Média Densidade.

MDP – *Medium Density Particleboard* ou Painel de Média Densidade.

MOE – Módulo de Elasticidade.

MOR – Módulo de Ruptura.

MUF – *Melamine-Urea-Formaldehyde* ou Melamina-Ureia-Formaldeído.

OSB – *Oriented Strandboard* ou Painel de Fibras Orientadas.

PEDBD – Polietileno de Baixa Densidade Pós-industrial.

PELBD-g-AM – Polietileno Linear de Baixa Densidade Graftizado com Anidrido Maleico.

PET – Polietileno Tereftalato.

PF – *Phenol-Formaldehyde* ou Fenol-Formaldeído.

PP – Polipropileno.

PS – Poliestireno.

PVC – Policloreto de Vinila.

PUR – *Polyurethane Resin* ou Resina Poliuretana.

SNIF – Serviço Nacional de Informações Florestais.

TGA – Análise Termogravimétrica.

TP – Tração Perpendicular.

UF – *Urea-Formaldehyde* ou Ureia-Formaldeído.

WPC – *Wood Plastic Composites.*

WWF – *World Wide Fund for Nature.*

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 18
1.1 OBJETIVOS 21
1.1.1 Objetivo Geral 21
1.1.2 Objetivos Específicos 21
2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 22
2.1 Panorama Do Setor Florestal 22
2.2 Industria Moveleira 23
2.2.1 Breve histórico 24
2.2.2 Aspectos gerais da indústria moveleira 25
2.3 Painéis Aglomerados De Madeira 27
2.3.1 Breve histórico 27
2.3.2 Aspectos gerais dos painéis aglomerados 29
2.3.3 Fabricação industrial e produção de painéis aglomerados 32
2.3.4 Fatores que influenciam nas propriedades dos painéis aglomerados 37
2.4 Adesivo 38
2.4.1 Adesivo poliuretano bicomponente derivado da mamona (PUR) 40
2.5 Polímeros Plásticos 41
2.5.1 Polietileno Tereftalato 44
2.5.2 Painéis Aglomerados Com Pet Reciclado 46
2.6 Produtos Resinosos 48
2.6.1 Resina de *Pinus* - Breu 51
2.6.2 Painéis aglomerado feitos com Breu 52
2.7 Resíduos Pós-Consumo 54
2.7.1 Painéis Feitos Com Resíduos Pós-Consumo 58
3 SÍNTESE DA REVISÃO 60
4 MATERIAIS E MÉTODOS 61
4.1 Materiais Utilizados Para Produção Dos Painéis 62
4.1.1 Painéis Pós-consumo 62

4.1.2 Resina Poliuretana à base de Óleo de Mamona 63
4.1.3 Polietileno Tereftalato 64
4.1.4 Breu 65
5 METODOLOGIA 66
5.1 Estudo exploratório 66
5.2 Definição dos tratamentos 67
5.3 Produção das partículas 69
5.3.1 Composição granulométrica 71
5.3.2 Umidade das partículas 73
5.3.3 Massa específica das partículas 75
5.3.4 Razão de compactação 77
5.3.5 Cálculo da massa de partículas dos painéis 78
5.4 Produção dos painéis 79
5.5 Preparação dos corpos de provas 82
5.6 ENSAIOS FÍSICOS 83
5.6.1 Densidade (D) 83
5.6.2 Teor de umidade (U) 84
5.6.3 Inchamento em espessura 24h (I) e Absorção após 24h (A) 85
5.7 ENSAIOS MECÂNICOS 86
5.7.1 Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE) 87
5.7.2 Resistência à Tração Perpendicular (TP) 89
5.8 MICROSCOPIA ELETÔNICA DE VARREDURA (MEV) 92
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 93
6.1 Determinação Das Propriedades Das Partículas 93
6.1.1 Teor de umidade das partículas 93
6.1.2 Massa específica das partículas 94
6.1.3 Razão de compactação 95

6.1.4 Determinação granulométrica....95
6.2 ENSAIOS FÍSICOS....99
6.2.1 Densidade....100
6.2.2 Absorção de Água e Inchaço em Espessura....103
6.2.3 Umidade....106
6.2.4 Características Físicas (umidade, inchamento e absorção)....108
6.3 ENSAIOS MECÂNICOS....109
6.3.1 Módulo De Ruptura (MOR)....110
6.3.2 Módulo De Elasticidade (MOE)....113
6.3.3 Resistência a Tração Perpendicular (TP)....115
6.3.4 Características Mecânicas (módulos de ruptura, elasticidade e tração perpendicular)....117
6.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)....118
6.5 CLASSIFICAÇÃO DE ACORDO COM A ABNT NBR 14810-2 (2018)....126
CONSIDERAÇÕES FINAIS....130
REFERÊNCIAS....133

INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial, ocorrida no século XVIII, representou a força motriz necessária para a transição da sociedade do capitalismo comercial para o industrial. Esse marco transformou o modo de vida das pessoas, que migraram do meio rural para o urbano, e alterou o "modus operandi" das indústrias, que passaram a investir na produção em larga escala (HOBSBAWM, 2015). Os reflexos dessa revolução foram evidentes na Arquitetura, um dos principais indicadores do desenvolvimento de uma nação, onde as mudanças temporais são concretamente visíveis, como na transição da arquitetura clássica para a moderna (DUARTE, 1999).

Além disso, a revolução modificou a forma de adquirir bens e produtos, substituindo o consumo funcional, motivado por necessidades, por um desejo hedonista influenciado pelas tendências temporais e pela capacidade de compra (BAUMAN, 2008). Esse novo padrão de consumo acelerado, que persiste até os dias atuais e tem ganhado ainda mais velocidade com o avanço tecnológico, faz com que os produtos sejam rapidamente substituídos, impulsionados pela ânsia de acompanhar tendências efêmeras (BAUDRILLARD, 2005).

No âmbito da arquitetura de interiores, especialmente em relação aos mobiliários e à decoração, as trocas ocorrem de forma ainda mais veloz devido à influência da moda e das tendências temporais. Essa dinâmica resulta na substituição constante de peças consideradas ultrapassadas por outras mais atuais (ARAÚJO, 2016). Entretanto, essa busca incessante por acompanhar o que está em voga gera um aumento exponencial no volume de descartes. Quanto maior a demanda por bens, maior o consumo de matéria-prima e mais resíduos são gerados, contribuindo para o acréscimo das 81,8 toneladas produzidas anualmente no Brasil (IPEA, 2022).

Em 2018, o consumo de madeira industrial no Brasil foi de 220,9 milhões de m³, dos quais 15,53% destinaram-se às empresas madeireiras e 6,52% às empresas de fabricação de painéis, ambas fornecedoras de insumos para o setor moveleiro de base florestal (IBÁ, 2022). A indústria moveleira, buscando atender à demanda por novos produtos alinhados às tendências contemporâneas, tem intensificado seu consumo de madeira (ARAÚJO, 2016). Porém, conforme a Embrapa (2021), o Brasil enfrentará um grave problema relacionado ao aumento da demanda por madeira, uma vez que a relação entre oferta e demanda se tornará insustentável a médio prazo.

Como consequência do descarte, a quantidade de resíduos pós-consumo já é elevada e tende a aumentar. Embora a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) exija a separação e o descarte adequado de móveis em locais apropriados, como os ecopontos, o descarte inadequado ainda persiste. Mesmo sendo considerado crime pela Lei Federal nº 9.605 de 1998, que estabelece sanções para condutas e atividades prejudiciais ao meio ambiente, essa prática continua comum. Móveis descartados de forma incorreta podem funcionar como abrigo para vetores, degradar o meio ambiente e a paisagem urbana, poluir visualmente as áreas e desvalorizar as regiões, entre outros impactos negativos (BRASIL, 1998).

O Brasil está entre os países que mais geram resíduos sólidos. A destinação final desses resíduos deveria, conforme as legislações vigentes, ser economicamente positiva e utilizar as tecnologias disponíveis em prol do desenvolvimento sustentável (IPEA, 2022). Existem resíduos mais complexos, como os provenientes da construção civil, da indústria e do agronegócio, mas também há aqueles considerados comuns, originados das atividades domiciliares e comerciais (BRASIL, 2010).

Entre todos os tipos de resíduos, os plásticos se destacam por serem os mais abundantes, devido ao uso crescente desse material presente em embalagens, eletrodomésticos, mobiliário, entre outros (CATTO *et al*., 2014). Embora derivados do petróleo, os plásticos apresentam impactos negativos devido à dependência de uma matéria-prima cara e à dificuldade de degradação (ZANIN e MANCINI, 2022). Esse material representa um grande desafio para a sociedade contemporânea e para as futuras gerações, uma vez que cerca de 40% dos produtos fabricados com polímeros se tornam resíduos em menos de um mês. Anualmente, são produzidas mais de 400 milhões de toneladas de plástico, sendo que um terço desse volume corresponde a embalagens (NISTICO, 2020). Segundo o 11º Censo de Reciclagem de PET, apenas 55% das embalagens de polietileno tereftalato foram recicladas em 2019; o restante foi destinado a aterros sanitários ou descartado inadequadamente, poluindo o meio ambiente e degradando paisagens (ABIPET, 2020).

Esses dados revelam um cenário alarmante de acúmulo insustentável de resíduos no Brasil, ao mesmo tempo em que a demanda por matérias-primas continua a crescer. Nesse contexto, destaca-se a busca por meios de produção mais sustentáveis para atender à elevada demanda por recursos naturais finitos e valiosos. A pesquisa científica atual tem priorizado alternativas que aumentem o

aproveitamento de resíduos (CAZELLA *et al*., 2024; DE SOUZA *et al*., 2023; HERRADON *et al.*, 2023; RODRIGUES *et al.*, 2023), buscando reduzir ou até mesmo substituir completamente o uso de recursos naturais.

Uma alternativa para a substituição da madeira maciça é a utilização dos produtos derivados de madeira. Esses materiais apresentam vantagens significativas, como maior estabilidade dimensional devido à produção controlada, menor peso e custo reduzido, já que podem ser fabricados a partir de resíduos. Além disso, possuem menor consumo energético e tempo de produção reduzido (SILVA, 2016). Os painéis de madeira agregam valor a materiais que anteriormente eram descartados e, em alguns casos, geravam prejuízos. Também contribuem para a redução de novos plantios florestais, que demandam espaço e recursos naturais, evitando o uso de madeiras ilegais (PROTÁSIO *et al*., 2015).

Outro ponto relevante é o uso de adesivos aglomerantes em painéis particulados. As resinas à base de formaldeído, como Ureia-Formaldeído (UF), Melamina-Ureia-Formaldeído (MUF) e Fenol-Formaldeído (PF), são amplamente utilizadas pela indústria, sendo a escolha de quase 95% dos fabricantes (DIAS, 2005; PĘDZIK *et al.*, 2021). Entretanto, essas resinas apresentam desvantagens significativas, incluindo baixa resistência à umidade e emissão de formaldeído, que prejudicam tanto a saúde quanto o meio ambiente (CETIN; OZMEN, 2002; LEE *et al*., 2022; PIZZI; MITTAL, 2017; ZAU *et al.,* 2014). Uma alternativa promissora, alinhada aos preceitos ambientais e sociais, é o uso de adesivos alternativos à base de materiais renováveis, como o poliuretano produzido a partir de óleo de mamona (ATAR *et al.*, 2014; CAZELLA *et al.,* 2024).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo a produção de painéis aglomerados utilizando partículas provenientes da desagregação de painéis pós-consumo do tipo MDP (Medium Density Particleboard ou Painel de Partículas de Média Densidade). Para isso, será empregada uma resina poliuretana à base de óleo de mamona, com adição de PET e/ou breu, visando o desenvolvimento de novos produtos. Esse processo busca oferecer alternativas para a indústria de produtos derivados de madeira, além de reduzir a quantidade de resíduos plásticos e painéis pós-consumo, promovendo uma produção alinhada com os princípios do desenvolvimento sustentável.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar a viabilidade da reutilização de resíduos de móveis fabricados com painéis pós-consumo do tipo MDP (*Medium Density Particleboard* ou Painel de Partículas de Média Densidade), para a produção de novos painéis aglomerados.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

I. Avaliar, física e mecanicamente, os painéis pós-consumo, segundo parâmetros da ABNT NBR 14810-2:2018.
II. Obter as partículas de madeira através do processo de desagregação dos painéis pós-consumo.
III. Determinar através dos resultados físicos e mecânicos a classificação dos novos painéis produzidos por meio das misturas, segundo parâmetros da ABNT NBR 14810-2:2018.
IV. Avaliar os resultados, com o propósito de comparar com os desempenhos dos painéis originais e os de pesquisas correlatas.

2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Esta seção foi organizada em tópicos com o objetivo de detalhar a revisão literária realizada sobre a produção de painéis aglomerados. São abordados diversos aspectos, incluindo o panorama do setor florestal, a indústria moveleira, os resíduos pós-consumo, os polímeros plásticos, os materiais resinosos, os métodos de fabricação de painéis e os principais fatores que influenciam suas propriedades finais.

A finalidade desta seção é oferecer uma compreensão objetiva e concisa sobre os painéis aglomerados, os resíduos pós-consumo, o adesivo à base de óleo de mamona e os aditivos PET e breu. Além de explorar os materiais utilizados, também se busca analisar os resultados encontrados em estudos anteriores, de modo a compará-los com os resultados da presente pesquisa.

2.1 PANORAMA DO SETOR FLORESTAL

Mais de 75% da biodiversidade terrestre encontra-se nas florestas, que desempenham um papel crucial na preservação do equilíbrio ambiental global (SOFO, 2022). O desmatamento, entretanto, tem consumido áreas florestais essenciais para a sobrevivência de pessoas, animais e espécies vegetais. Estimativas da Organização das Nações Unidas (ONU) indicam que 13 milhões de hectares de florestas são destruídos anualmente. Esse processo é a segunda maior causa das mudanças climáticas, sendo responsável por quase 20% das emissões globais de gases de efeito estufa, superando as emissões provenientes de todos os meios de transporte. A mitigação do aquecimento global depende diretamente da preservação, conservação e gestão sustentável das áreas florestais. As florestas desempenham um papel fundamental ao absorver gases de efeito estufa, regular o ciclo da água e oferecer habitat para espécies animais e vegetais únicas (SOFO, 2022).

Atualmente, 31% da superfície terrestre é coberta por florestas, sendo que apenas cinco nações — Rússia, Brasil, Canadá, Estados Unidos e China — concentram mais da metade dessa área, conforme demonstrado na Figura 1. O Brasil, com 498 milhões de hectares, destaca-se por ter 98,1% de florestas nativas e 1,9% de florestas plantadas. As principais espécies manejadas no país são o *eucalipto*, que ocupa 7,5 milhões de hectares, e o *pinus*, com 1,7 milhão de hectares (ABIMCI, 2023).

Figura 1 – Maiores Florestas do Mundo por Milhões de Hectares

Fonte: FAO (2022)

O setor florestal brasileiro destaca-se por ter as florestas plantadas como principal fonte de matéria-prima, utilizada na fabricação de uma ampla variedade de produtos, como madeira maciça, celulose, pellets, fibras, carvão, móveis e subprodutos, incluindo cascas, óleos e resinas (OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2017). As condições favoráveis de solo e clima do Brasil oferecem vantagens significativas em comparação a outros países. As árvores cultivadas em solo brasileiro são referência na produção de celulose e laminados, o que torna a participação do país expressiva no mercado mundial (SNIF, 2020).

Mais de mil municípios brasileiros são diretamente impactados pela economia das indústrias de base florestal. Esse setor gera empregos em áreas urbanas e rurais, impulsiona o desenvolvimento econômico e contribui para a melhoria do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) dos estados (ABIMCI, 2022). Segundo o Relatório ABIMCI de 2022, mais de 28 mil empresas produtoras de móveis operam nas regiões Sul e Sudeste. Esse cenário reflete os investimentos realizados em florestas plantadas nas décadas anteriores.

Adicionalmente, estima-se um investimento de R$ 54,2 bilhões no setor florestal brasileiro entre 2023 e 2028, destinado a florestas, pesquisa e desenvolvimento, operações, modernização e construção de fábricas (IBÁ, 2023).

2.2 INDUSTRIA MOVELEIRA

2.2.1 Breve histórico

A arquitetura exerceu, historicamente, influência significativa na fabricação de móveis, embora não seja possível determinar com precisão o momento em que o mobiliário começou a ser produzido. Os primeiros modelos projetados de mobiliário remontam à Idade Média, quando eram desenvolvidos para atender às necessidades cotidianas das habitações, como mesas, cadeiras, armários e escrivaninhas (BRANCO, 1983). Na mesma época, construções imponentes, como castelos e fortalezas, apesar de marcantes na paisagem, apresentavam interiores vazios devido à escassez de mobiliário para preencher seus amplos espaços. Nessas edificações, o objetivo principal dos móveis era destacar a grandiosidade dos ocupantes, relegando o conforto a uma função secundária (BURDEK, 2006).

A produção de móveis, inicialmente, era artesanal, realizada em oficinas familiares, onde o conhecimento era transmitido de geração em geração. A confecção de um móvel considerava o público-alvo, a cultura e os costumes locais (MATUCHEVSKI *et al*., 2020). A matéria-prima predominante era a madeira maciça, que possibilitava entalhes e conferia características únicas, refletindo o traço do artesão. Os móveis eram geralmente feitos por encomenda, voltados para consumidores específicos (MEIRELES, 2018).

Com a Revolução Industrial, a produção moveleira passou a integrar o modelo fabril, transformando o trabalho artesanal em assalariado e impulsionando a urbanização da época. Esse processo consolidou o "culto à novidade" (BOTTINI; BATISTA, 2013). A curiosidade e o entusiasmo pelo novo, aliados à necessidade de demonstrar status pessoal, modificaram o estilo de vida e o comportamento social (MORAES, 1999). O advento da moda alterou o padrão de consumo, que passou de um modelo de transmissão de bens entre gerações para um modelo de substituição frequente, em conformidade com as tendências da época (MEIRELES, 2018).

No Brasil, a produção de móveis teve início com a chegada dos primeiros colonos, que, limitados pelo espaço nos navios, trouxeram apenas o essencial e precisaram produzir seu próprio mobiliário. Esse contexto deu origem às primeiras extrações de madeira nativa para fabricação de móveis (NASCIMENTO, 2015). Por muitos anos, a produção manteve-se tipicamente artesanal, sendo posteriormente

substituída por um processo industrial com o desenvolvimento de cidades como São Paulo e Rio de Janeiro (MATUCHEVSKI *et al*., 2020).

Os primeiros móveis industrializados no Brasil foram produzidos em pequena escala, utilizando madeira maciça. Com o crescimento do mercado, surgiram polos moveleiros em diferentes regiões do país, capazes de atender às grandes demandas, sem abandonar as particularidades de cada mercado consumidor (NASCIMENTO, 2015). Até os anos 1950, a indústria moveleira brasileira atendia exclusivamente ao mercado interno. Entretanto, a partir da década de 1960, iniciou-se um processo de expansão comercial, permitindo a entrada do país no comércio internacional de móveis. Na década de 1970, a indústria se consolidou nacional e internacionalmente (MATUCHEVSKI *et al*., 2020).

Com as mudanças no estilo de vida e os avanços na indústria moveleira, novas tecnologias viabilizaram o uso de diferentes matérias-primas e processos produtivos. Como resultado, o mercado foi inundado por uma ampla variedade de produtos, prontos para atender aos desejos mais diversificados e acompanhar as tendências efêmeras (ALMEIDA; FERREIRA; MAIA, 2019).

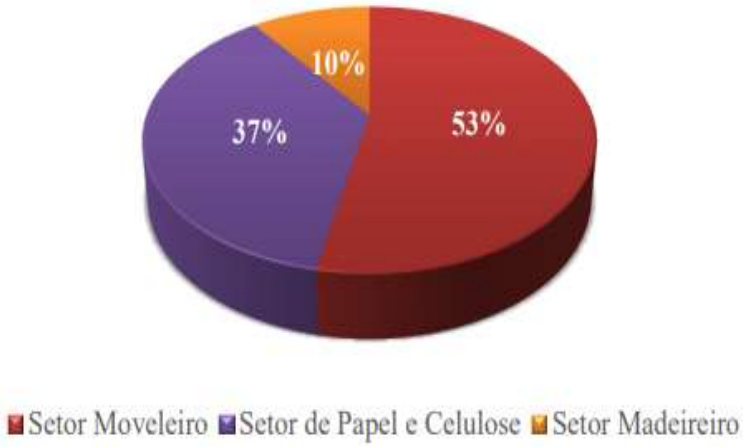
2.2.2 Aspectos gerais da indústria moveleira

A indústria moveleira é uma das principais consumidoras de madeira no Brasil. Em 2018, o setor gerou mais de 200 mil empregos e contou com cerca de 90 mil empresas em operação. Nesse período, a produção alcançou aproximadamente 440 milhões de peças, as exportações superaram o montante de 2 bilhões de reais, e os investimentos no setor totalizaram 1,4 bilhão de reais (ABIMÓVEL, 2019).

Na região Sudeste, as empresas florestais estão organizadas em três principais segmentos: Madeireiro; Papel e Celulose; e Moveleiro (LEMOS, 2023).

Dentre esses segmentos, o setor moveleiro apresenta maior concentração, representando 53% das empresas existentes, conforme ilustrado na Figura 2. Essa predominância deve-se à capacidade das empresas moveleiras de absorver a matéria-prima fornecida pelas madeireiras e à ampla diversidade de atuação do setor, que abrange empresas de médio e pequeno porte. A região Sudeste abriga 44% das empresas moveleiras do Brasil, com o estado de São Paulo concentrando o maior número dessas empresas (APRE, 2020).

Figura 2 – Divisão do Setor Empresarial que Trabalha com Madeira no Brasil



Fonte: LEMOS (2023)

A movelaria pode ser classificada de acordo com diferentes parâmetros:

- **Material predominante**: madeira, aço, sintéticos, entre outros;
- **Uso do móvel**: residencial, comercial ou institucional;
- **Processo produtivo**: seriado ou sob encomenda;
- **Design empregado** (LEMOS, 2023).

Na produção de móveis, mais de 77% utilizam madeira e derivados, sendo majoritariamente destinados ao uso residencial (MEIRELES, 2018). Os móveis residenciais podem ser subdivididos em:

- **Móveis retilíneos**: produzidos com painéis de madeira, caracterizados por superfícies lisas e sem detalhes complexos;
- **Móveis torneados**: fabricados com madeira maciça ou em combinação com painéis, sendo considerados mais refinados devido ao acabamento artesanal;
- **Móveis sob medida**: confeccionados por encomenda, com a escolha da matéria-prima definida pelo consumidor (LEÃO; NAVEIRO, 2009).

A maioria dos móveis produzidos no Brasil segue o modelo seriado, voltado para atender consumidores com menor poder aquisitivo (NOSSAK, 2014). Segundo Nossak (2014), os painéis de madeira reconstituída desempenham papel essencial nesse tipo de produção, conferindo maior homogeneidade aos produtos e rapidez ao processo produtivo.

As transformações na forma de produção, nas matérias-primas utilizadas e nos padrões de consumo, resultantes do capitalismo, estão diretamente relacionadas aos avanços tecnológicos, sociais e comportamentais da sociedade ao longo da história

(BURGO, 2012). Mudanças no modelo econômico refletem-se em diferentes aspectos da vida cotidiana, incluindo a arquitetura, os desejos e as tendências.

Nos últimos anos, o setor moveleiro nacional apresentou crescimento significativo, e as expectativas apontam para a continuidade dessa expansão. O processo de produção de móveis no Brasil encontra-se em evolução, com a incorporação crescente de tecnologias que permitem à indústria competir em nível internacional, garantindo qualidade para rivalizar com qualquer produtor estrangeiro (MATUCHEVSKI *et al*., 2020).

2.3 PAINÉIS AGLOMERADOS DE MADEIRA

2.3.1 Breve histórico

Em 1907, H. A. Browne produziu o primeiro aglomerado de madeira ao utilizar serragem e resina termofixa para formar blocos de madeira (GUPTA *et al.,* 2015). Posteriormente, os primeiros painéis aglomerados foram confeccionados com lascas e serragem de madeira unidas por uma cola à base de caseína (LIU *et al*., 2019).

A indústria de painéis aglomerados surgiu na década de 1940, na Alemanha, durante a Segunda Guerra Mundial. A escassez de madeira motivou o aproveitamento de resíduos industriais e de serrarias como matéria-prima para atender à crescente demanda por compensados no mercado (IWAKIRI, 2005). Contudo, após a guerra, a produção de aglomerados declinou devido à falta de resina no mercado, uma vez que sua fabricação dependia do petróleo, amplamente destinado a usos militares. Somente em 1946, nos Estados Unidos, a produção de aglomerados foi retomada (IWAKIRI, 2005). Durante a década de 1960, as instalações industriais foram ampliadas, e os avanços tecnológicos impulsionaram a produção de painéis. Na década seguinte, melhorias nos processos de fabricação e equipamentos permitiram o desenvolvimento de novos tipos de painéis, incluindo chapas estruturais mais resistentes, como *waferboard* e *oriented strandboard* (OSB) (MENDES *et al*., 2003).

No Brasil, a produção de chapas de madeira aglomerada também teve como fator impulsionador a escassez de madeira, aliada à necessidade de aproveitamento econômico dos resíduos industriais (ROQUE; VALENÇA, 1998). Na década de 1960, o grupo francês Louis Dreiffus iniciou a fabricação de painéis aglomerados em

Curitiba, Paraná, fundando a indústria Placas do Paraná (IWAKIRI, 2005). A localização foi estrategicamente escolhida devido à grande quantidade de resíduos gerados pela indústria moveleira na região sul. Na década seguinte, a fábrica da Satipel foi instalada em Taquari, Rio Grande do Sul, seguida pelas unidades do grupo nacional Peixoto de Castro (Madeplan e Alplan) e do grupo alemão Freundemberg, posteriormente adquiridas pela Duratex, em 1984 (IWAKIRI, 2005).

Os investimentos e avanços tecnológicos no setor de painéis de madeira iniciaram-se apenas nos anos 1990. A implementação de prensas contínuas modernizou as linhas de produção, aumentando a capacidade produtiva e reduzindo custos (MATTOS *et al*., 2008). Entre os produtos fabricados destacam-se o OSB, o MDF (Medium Density Fiberboard ou Painel de Fibra de Densidade Média) e o MDP (Medium Density Particleboard ou Painel de Partícula de Média Densidade), amplamente utilizados pela indústria moveleira (TRIANOSKI, 2010).

Ainda hoje, as indústrias de painéis aglomerados no Brasil estão concentradas predominantemente nas regiões Sul e Sudeste, visando atender à demanda dos polos moveleiros localizados nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (IWAKIRI *et al*., 2020). Essas fábricas desempenham papel essencial ao abastecer a indústria moveleira, movimentar recursos, gerar empregos e fortalecer o setor florestal-madeireiro (NOCE *et al*., 2008).

Conforme o grupo IMARC (2022), o mercado global de painéis aglomerados alcançou 22,2 bilhões de dólares em 2022, com previsão de atingir 27,9 bilhões até 2028. A produção mundial concentra-se majoritariamente na Ásia (60%), seguida pela Europa (24%) e América do Norte (11%). Países como Brasil, Rússia, Alemanha, Polônia e Turquia também se destacam nesse mercado. No Brasil, a produção atingiu 3,5 milhões de metros cúbicos em 2021 (FAO, 2021). Entre 1995 e 2005, o consumo nacional de painéis aglomerados do tipo MDP cresceu de 866 mil m³ para 2.098 mil m³, representando um aumento médio anual de 9,3% (MATTOS *et al*., 2008).

Os avanços tecnológicos no setor permitiram ajustes nos processos produtivos, acompanhados pela modernização de maquinários e maior flexibilidade nas operações industriais. Esses fatores resultaram em produtos com maior qualidade e maior competitividade no mercado (REMADE, 2014). Segundo Mendes (2010), o mercado mundial de painéis aglomerados apresenta crescimento significativo, impulsionado pelo fortalecimento contínuo do setor moveleiro.

2.3.2 Aspectos gerais dos painéis aglomerados

A norma ABNT NBR 14810-1 (2013) define os painéis de partículas como produtos fabricados com partículas de madeira combinadas com adesivo e resina sintética termofixa, reconstituídas em uma matriz consolidada por calor e pressão. A *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2016), por sua vez, caracteriza esses painéis como compósitos formados por partículas de materiais celulósicos aglutinados, podendo conter aditivos.

De acordo com a FAO (2022), um painel de partículas pode ser produzido com pequenas partículas de madeira, como chips, flocos e outros materiais lignocelulósicos. É possível alterar os parâmetros essenciais de fabricação dos painéis, como densidade, tipo de partículas, adesivos, métodos de produção e aditivos, com o objetivo de aprimorar custos, aumentar a velocidade de produção e adaptar os painéis a finalidades específicas, como aplicações estruturais, de fechamento, mobiliário ou decoração (HERRADON, 2023; IWAKIRI, 2005). Esses painéis são amplamente utilizados em situações que exigem alta estabilidade dimensional e podem ser fabricados em diferentes densidades e espessuras, de acordo com as necessidades (FAO, 2022).

Segundo Astari *et al*. (2019), a distribuição homogênea das partículas dentro dos painéis pode melhorar suas propriedades mecânicas. Além disso, os painéis aglomerados podem ser produzidos com uma ampla variedade de fibras ou materiais lignocelulósicos, como aparas de árvores, lascas, cavacos, casca de arroz, palha de milho, bagaço de cana-de-açúcar e espécies de madeira com menor valor comercial (IWAKIRI, 2005; ASTARI et al., 2019; MARAVEAS, 2020). O uso de resíduos na produção desses painéis melhora o processo produtivo, valida materiais sem valor agregado e oferece um destino ambientalmente mais adequado, além de gerar retorno financeiro (SOUZA, 2009).

A escolha da matéria-prima para os aglomerados depende de vários fatores:

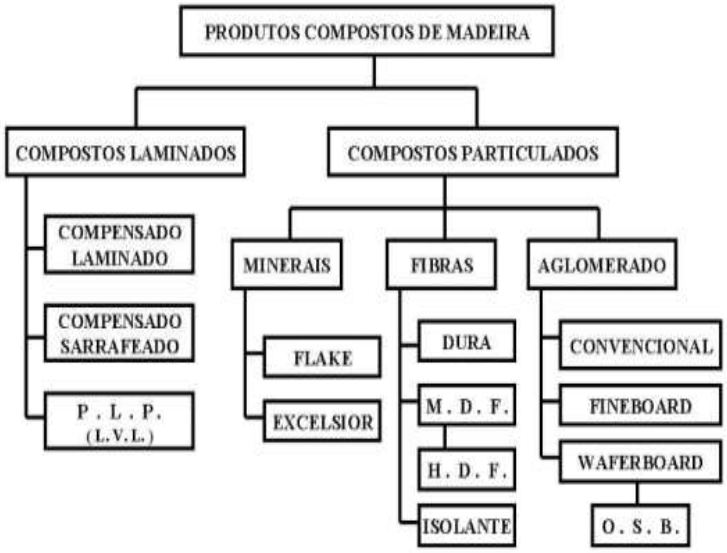
- Propriedades físicas, químicas e mecânicas do material;
- Disponibilidade da matéria-prima;
- Possibilidade de armazenamento;

- Volume de fornecimento constante para atender à produção industrial (PAPADOPOULOU *et al.*, 2015).

A resina mais utilizada para aglutinar as partículas em escala industrial é a ureia-formaldeído, embora resinas fenol-formaldeído sejam empregadas quando maior resistência é necessária. Durante a produção, é comum a adição de produtos que conferem resistência à umidade e ao fogo, além de proteção contra mofo e insetos, sendo esses conhecidos como aditivos (BNDES, 2014).

Conforme a FAO (2022), os painéis compensados dominam o mercado na Ásia, especialmente na China, enquanto OSB, aglomerados e MDF são amplamente utilizados na América do Norte e na Europa. De forma geral, os compostos de madeira podem ser classificados conforme a Figura 3.

Figura 3 - Representação dos compostos de madeira



Fonte: Iwakiri (2005)

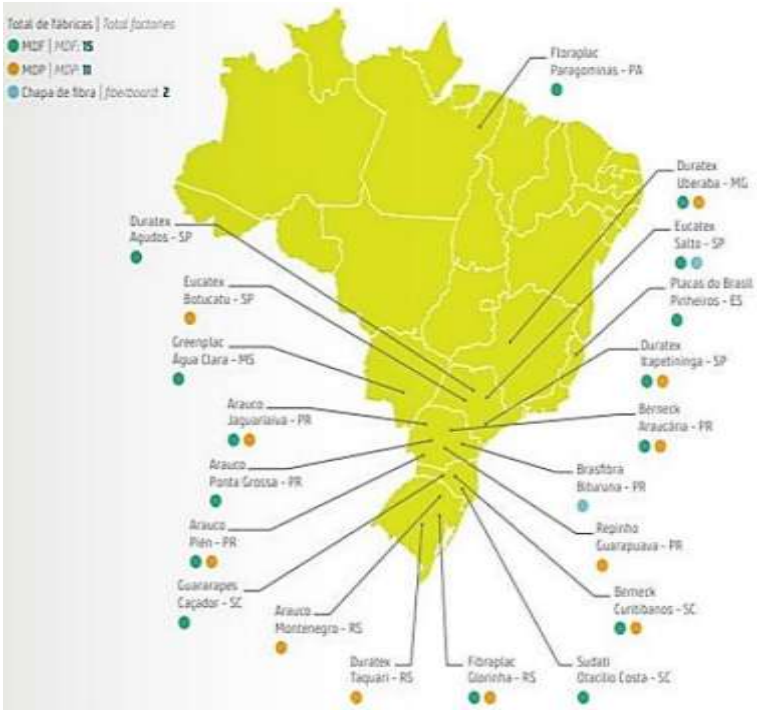
Os painéis aglomerados desempenham um papel fundamental no setor moveleiro, ao substituir a madeira maciça. Segundo Müzel *et al*. (2015) e Nascimento, Lahr e Christoforo (2015), os aglomerados apresentam diversas vantagens em relação à madeira maciça:

- Redução de defeitos comuns da madeira, como anisotropia e heterogeneidade;
- Aproveitamento integral da árvore, reduzindo a geração de resíduos;
- Utilização de madeiras de rápido crescimento e reflorestamento;
- Produção a partir da reutilização de madeira;
- Disponibilidade de painéis em variadas dimensões;

- Maior estabilidade dimensional;
- Melhoria na resistência à biodeterioração;
- Incremento nas propriedades físicas e mecânicas, com a possibilidade de adicionar aditivos;
- Melhor impregnação de produtos preservativos;
- Emprego de partículas alternativas;
- Redução de custos;
- Menor demanda por energia no processo produtivo.

Atualmente, as principais empresas que produzem painéis à base de madeira no Brasil incluem: 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 Maciça Mais Confiança (NASCIMENTO; LAHR; CHRISTOFORO, 2015). A Figura 4 apresenta a distribuição geográfica das empresas produtoras de painéis no Brasil.

Figura 4 - Empresas de painéis MDF, MDP e Chapa de Fibra no Brasil

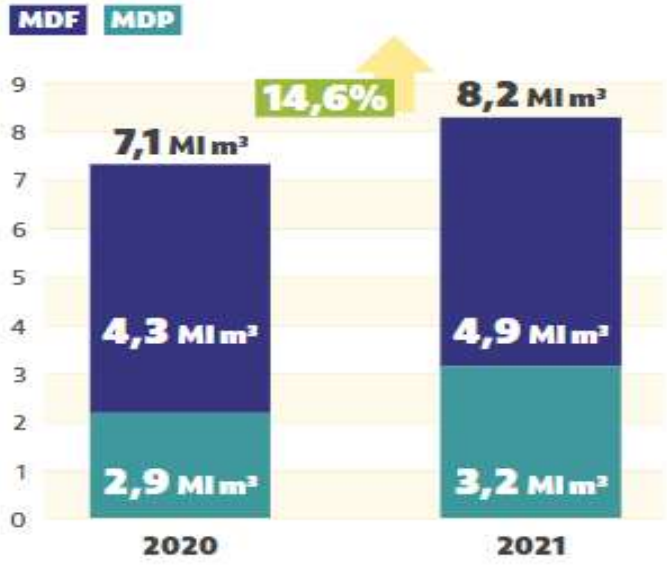


Fonte: Adaptado de IBÁ (2020)

Devido às suas linhas retas e características dimensionais, físicas e mecânicas, os painéis aglomerados do tipo MDP são amplamente utilizados na fabricação de móveis comerciais e residenciais. Esses painéis são empregados, principalmente, em portas, divisórias, prateleiras, tampos, bases e gavetas (IBÁ, 2022).

Os painéis aglomerados lideram o mercado no segmento residencial, impulsionados pelo processo de urbanização e pelos padrões de consumo globais (IMARC, 2022). O setor de painéis de madeira para uso doméstico apresentou um crescimento de 14,6% em 2021, resultado das mudanças provocadas pela pandemia e pela popularização do formato de trabalho remoto, o *home office*. A Figura 5 ilustra o aumento nas vendas de painéis MDF, com crescimento de 15,7%, e MDP, com incremento de 13,1% no mesmo período (IBÁ, 2022).

Figura 5 - Crescimento das vendas de painéis MDF e MDP



Fonte: Relatório Anual IBÁ (2022)

Cazella (2022) destaca que o crescimento do setor da construção civil está diretamente relacionado à demanda crescente do mercado e à produção acelerada de painéis aglomerados, especialmente os do tipo MDF e MDP. Esse aumento é impulsionado pela maior quantidade de reformas, ampliações e novas construções. À medida que mais espaços são criados, cresce também a demanda por mobiliários. Além disso, a rápida substituição de tendências contribui para uma necessidade ainda maior de matéria-prima, a fim de atender aos desejos e padrões de consumo dos consumidores.

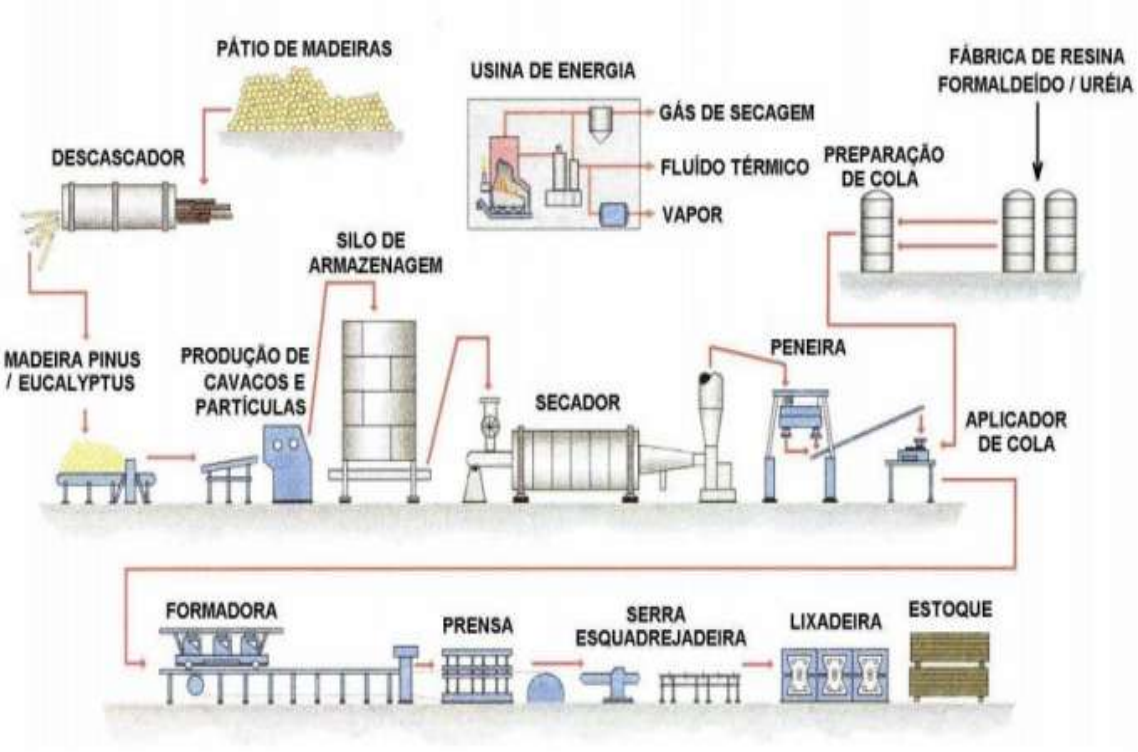
2.3.3 Fabricação industrial e produção de painéis aglomerados

Conforme Iwakiri (2005), o processo de fabricação dos painéis de madeira aglomerada, apresentado na Figura 6, segue um fluxo que, embora possa sofrer alterações pontuais, geralmente mantém as etapas fundamentais. Essas etapas descrevem os principais estágios do processo produtivo, essenciais para a fabricação de painéis de qualidade. Os estágios do processo são descritos da seguinte maneira:

1. **Pátio de Madeiras**: centro de armazenagem da matéria-prima bruta, onde a madeira é estocada em quantidade suficiente para a produção e reserva.
2. **Descascador**: equipamento que remove a casca das toras, deixando a superfície exposta e reduzindo irregularidades.
3. **Separação**: as madeiras são organizadas por espécie para uso isolado ou em combinações específicas.
4. **Produção de cavacos e partículas**: partículas de madeira são fabricadas nas dimensões necessárias para o painel.
5. **Silo de Armazenagem**: local para acondicionar as partículas, protegendo-as de contaminantes antes do uso.
6. **Secador**: etapa que estabiliza a umidade das partículas, garantindo a cura adequada da resina e a qualidade do painel final.
7. **Peneira**: sistema que separa e classifica as partículas por granulometria; as maiores ficam nas peneiras superiores e as menores, nas inferiores.
8. **Fábrica de Resina Formaldeído/Ureia e Preparação da Cola**: etapa em que as resinas bicomponentes são preparadas e aditivos são incorporados.
9. **Aplicador de Cola**: adesivo é aplicado às partículas, variando entre 5% e 15% do peso seco, dependendo da finalidade do painel.
10. **Formadora**: as partículas são depositadas em moldes para formar o colchão que dará forma ao painel.
11. **Prensa**: o colchão é prensado a quente com pressão, temperatura e tempo controlados, fatores cruciais para a qualidade do produto.
12. **Acondicionamento**: local onde os painéis permanecem por, no mínimo, 48 horas em condições adequadas.
13. **Serra Esquadrejadora**: equipamento utilizado para remover bordas e imperfeições dos painéis.
14. **Lixadeira**: nivela e alisa as camadas externas, conferindo valor ao produto.
15. **Classificação**: os painéis são categorizados conforme padrões de qualidade.

16. **Embalagem**: os painéis são protegidos para transporte e comercialização.
17. **Estoque**: local de armazenamento dos painéis prontos painéis.

Figura 6 - Fluxograma da fabricação dos painéis aglomerados



Fonte: Adaptado de Iwakiri (2005)

Em resumo, o processo de produção dos painéis de madeira aglomerada envolve as seguintes etapas: geração de partículas, secagem, classificação das partículas, aplicação de adesivo e aditivos químicos, formação do colchão, pré-prensagem, prensagem a quente, resfriamento, acondicionamento, acabamento, classificação e armazenagem (IWAKIRI; TRIANOSKI, 2020). Quanto aos custos de fabricação dos painéis, a matéria-prima, especialmente quando composta por madeira nobre, representa o maior componente, correspondendo a 30% a 40% do valor total do painel. O custo do adesivo ou resina é o segundo maior, variando entre 15% e 30% do custo total (SOLT *et al.,* 2019). Outros fatores que contribuem significativamente para o custo incluem: energia, responsável por 15% a 20%; mão de obra, entre 5% e 20%; e o acabamento do painel, que representa de 25% a 30% do custo total (SOLT *et al*., 2019). Iwakiri (2005) classifica os painéis de madeira aglomerada com base na distribuição das partículas em sua composição, conforme apresentado na Figura 7:

- **Painéis homogêneos**: caracterizados pela distribuição aleatória das partículas ao longo de toda a extensão do painel.

- **Painéis heterogêneos ou multicamadas**: apresentam diferenciação entre as camadas, determinada pela granulometria das partículas. As partículas menores localizam-se na superfície, enquanto as maiores formam o núcleo do painel.

Figura 7 - Distribuição das partículas dos painéis aglomerados

Fonte: SANTOS JUNIOR (2024)

Iwakiri (2005), classifica os painéis de madeira com base em suas características nas seguintes categorias:

Por densidade:

- **Baixa densidade**: até 0,59 g/cm³
- **Média densidade**: de 0,59 a 0,80 g/cm³
- **Alta densidade**: acima de 0,80 g/cm³

Por tipo de partículas:

- **Aglomerado convencional**: partículas do tipo "*sliver*"
- **Chapas de partículas tipo "flake" (*flakeboard)***
- **Chapas de partículas tipo "wafer" (*waferboard*)**
- **Chapas de partículas tipo "strand" (*strandboard*)**

Pela distribuição das partículas:

- **Chapas homogêneas**
- **Chapas de múltiplas camadas**
- **Chapas de camadas graduadas**
- **Chapas de partículas orientadas** (*oriented strand board – OSB*)

Os ensaios normativos definidos pelas ABNT NBR 14810-1 (2013) e ABNT NBR 14810-2 (2018) permitem a classificação dos painéis com base em suas propriedades físicas e mecânicas.

Propriedades mecânicas analisadas:

- **Módulo de Ruptura (MOR)**
- **Módulo de Elasticidade (MOE)**
- **Resistência à tração perpendicular ou ligação interna (TP)**
- **Arrancamento de parafuso (AP)**

Propriedades físicas determinadas:

- **Densidade aparente (D)**
- **Teor de umidade (U)**
- **Inchamento em espessura após 24 horas (I24)**

A Tabela 1 apresenta os valores mínimos das propriedades físicas e mecânicas requeridos pela norma ABNT NBR 14810-2 (2018) para painéis com espessuras entre 13 e 20 mm, juntamente com suas respectivas classificações:

Tabela 1 - Valores mínimos das propriedades físicas e mecânicas

Classificação	I24h (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P. (MPa)
P2	22	11	1600	0,35
P3	14	15	1950	0,45
P4	15	16	2300	0,35
P5	10	18	2400	0,45
P6	16	20	3000	0,50
P7	10	22	3100	0,70

Fonte: Adaptado da NBR 14810-2 (2018)

A classificação dos painéis de partículas, pela mesma norma, leva em consideração sua resistência às cargas e a umidade do ambiente que pode ser utilizado, são seis as nomenclaturas dadas:

- **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

2.3.4 Fatores que influenciam nas propriedades dos painéis aglomerados

As propriedades físicas e mecânicas dos painéis são diretamente influenciadas por diversas variáveis que interagem entre si, tornando-se determinantes para a qualidade final do produto. Para garantir o desempenho e a durabilidade dos painéis, essas variáveis devem ser monitoradas e controladas. Segundo Araújo *et al.* (2019) e Maloney (1993), os principais fatores são:

- Massa específica da madeira;
- Densidade do painel;
- Geometria das partículas;
- Teor de umidade;
- Tipo e teor do adesivo;
- Método de formação do colchão;
- Parâmetros de prensagem.

A densidade é considerada o fator de maior impacto, pois influencia as propriedades e define o processo de produção dos painéis. Matérias-primas de baixa densidade podem resultar em painéis com módulo de elasticidade maior, melhor adesão interna, maior resistência à flexão e colagem mais eficiente (MALONEY, 1977; ARAÚJO *et al*., 2019). A relação entre a densidade do painel e das partículas, conhecida como razão de compactação, deve permanecer entre 1,3 e 1,6. Um fator de compactação elevado aumenta as propriedades mecânicas, mas reduz as propriedades físicas (ARAÚJO *et al.,* 2019; TRIANOSKI, 2015; IWAKIRI, 2005). Em matérias-primas densas, as paredes celulares mais espessas dificultam a impregnação do adesivo, resultando em ligações mais frágeis entre partículas e adesivo. Por essa razão, todas as propriedades do painel são influenciadas pela razão de compactação (MARTON, 2014).

A geometria das partículas afeta a resistência mecânica, a flexão estática e a tração perpendicular. Kelly (1977) e Araújo *et al.* (2019) destacam que as partículas devem ter dimensões homogêneas, pois partículas grandes podem dificultar a secagem, a aplicação do adesivo e a formação do colchão, enquanto partículas menores demandam maior quantidade de adesivo devido à maior área específica

(Maloney, 1993; Mosleni, 1974; Iwakiri, 2005). Partículas pequenas, no entanto, proporcionam um melhor acabamento superficial. Por essa razão, os fabricantes utilizam partículas finas nas camadas superficiais e maiores no núcleo do painel (THOEMEN *et al*., 2010).

O teor de umidade das partículas também influencia o desempenho dos painéis. Um teor elevado reduz a resistência mecânica e aumenta o tempo de prensagem, elevando o consumo de energia durante a produção (IWAKIRI, 2005). Por outro lado, partículas com baixo teor de umidade aumentam o risco de incêndio durante a prensagem, produzem maior quantidade de pó, transferem pouco calor da superfície ao núcleo e absorvem mais resina (IWAKIRI, 2005; MACIEL, 2001; MOSLEMI, 1974). Para evitar esses problemas, Iwakiri (2005) recomenda um teor de umidade ideal entre 3% e 6%, dependendo do tipo de adesivo utilizado.

A pressão durante a prensagem desempenha a função principal de unir e densificar o material até atingir a espessura projetada do painel (IWAKIRI, 2005). O tempo de prensagem corresponde ao intervalo desde o início da compressão do colchão até a abertura dos pratos da prensa. Esse tempo deve ser suficiente para a liberação da água excedente pelas laterais, permitindo a cura completa do adesivo (KELLY, 1977; MACIEL, 2001).

A temperatura de prensagem é fundamental para a polimerização e a cura do adesivo, além de facilitar a plasticização da madeira e a consolidação do colchão, permitindo que o painel atinja sua espessura final (IWAKIRI, 2005).

2.4 ADESIVO

Os adesivos são utilizados desde a antiguidade. Evidências indicam que os egípcios, por volta de 3000 a.C., utilizavam goma arábica, extraída de árvores, e uma cola feita com farinha e água, empregada para colar papiros delicados (AZEVEDO, 2009). Atualmente, define-se adesivo como toda substância, orgânica ou inorgânica, com propriedades aderentes, utilizada para aglutinar materiais (IWAKIRI, 2005). Segundo a ABNT NBR 14810-1 (2013), o adesivo tem como finalidade aglutinar partículas para a formação dos painéis.

Almeida *et al.* (2010) destacam que algumas propriedades dos adesivos influenciam diretamente a qualidade da colagem nos painéis:

- **Viscosidade**
- **Tempo de trabalho**
- **Teor de substâncias sólidas**
- **pH**

De acordo com Trianoski (2020), o adesivo é um componente essencial, pois afeta tanto as propriedades finais quanto os custos dos painéis aglomerados. Dessa forma, a quantidade de adesivo deve ser dosada de maneira precisa para minimizar custos sem comprometer as características desejadas. A proporção de adesivo geralmente varia entre 5% e 10% em relação ao peso seco das partículas (IWAKIRI, 2005). Maloney (1993) observa que a resistência à tração perpendicular (TP) melhora proporcionalmente ao aumento da quantidade de adesivo, embora esse aumento também eleve os custos.

Os adesivos podem ser classificados com base na sua origem:

- **Naturais**: obtidos a partir de proteínas animais, vegetais, entre outros.
- **Sintéticos**: incluem ureia, resorcinol, fenol e melamina, podendo ser subdivididos em termofixos e termoplásticos (CARNEIRO, 2010; NASCIMENTO *et al.,* 2015).

Paes *et al*. (2011) e Maloney (1993) afirmam que os adesivos sintéticos são mais utilizados na fabricação de compósitos devido às suas propriedades de adesão, resistência a ataques microbianos e menor custo em comparação aos adesivos naturais. Por essa razão, cerca de 90% dos adesivos utilizados são à base de ureia-formaldeído (UF), fenol-formaldeído e melamina-formaldeído.

O UF, classificado como termofixo, modifica-se química e fisicamente quando aquecido, tornando-se um material rígido. É o adesivo sintético de menor custo, fácil manuseio, rápida cura e incolor (SILVA, 2016). Entretanto, a ureia-formaldeído é utilizada apenas em painéis destinados a ambientes internos, devido à baixa resistência à umidade. Além disso, a liberação de gás formaldeído durante a prensagem torna-o insalubre e prejudicial (MARRA, 1992; CHIPANSKI, 2006).

Diante desse cenário, pesquisas têm se concentrado no desenvolvimento de adesivos alternativos que sejam biodegradáveis, atóxicos, não poluentes e oriundos de fontes renováveis. Exemplos incluem poliuretano derivado de óleo de mamona, poliuretano de amido, entre outros, em conformidade com os princípios do desenvolvimento sustentável (AZEVEDO, 2009; FIORELLI *et al.,* 2013).

2.4.1 Adesivo poliuretano bicomponente derivado da mamona (PUR)

Em 1980, o Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo iniciou estudos sobre poliuretanos derivados do óleo de mamona (AZEVEDO, 1999). A semente da mamona (*Ricinus communis*), encontrada em áreas tropicais e subtropicais, é a fonte do óleo utilizado na fabricação do adesivo (FIORELLI *et al*., 2013). A preparação do adesivo poliuretano bicomponente derivado do óleo de mamona (PUR) ocorre em duas etapas:

- **Pré-polímero**: etapa em que a polimerização permanece incompleta;
- **Poliol**: formação do poliuretano completo (SILVA *et al.,* 2016).

Esse método permite controle preciso das propriedades do adesivo, uma vez que a polimerização ocorre apenas quando os dois componentes são misturados. A rigidez e a flexibilidade do adesivo podem variar dependendo da dosagem de poliol (JESUS, 2000; SILVA *et al.,* 2016).

Os painéis fabricados com resinas de poliuretano apresentam características semelhantes às das resinas fenólicas. Entretanto, o poliuretano oferece maior resistência à umidade e não libera formaldeído durante a fabricação (DIAS, 2005). As principais vantagens do adesivo derivado do óleo de mamona incluem:

- Ser composto por matéria-prima natural e renovável;
- Não ser agressivo ao meio ambiente nem ao ser humano;
- Ser fruto de tecnologia brasileira (DIAS, 2005).

Embora o PUR seja mais caro que o UF, Alves *et al.* (2021) argumentam que o aumento das pesquisas com óleos naturais e os resultados positivos podem estimular maior investimento nesse tipo de material. Isso pode levar a uma redução nos custos devido ao aumento da oferta desses adesivos alternativos. Além disso, o óleo de mamona, sendo naturalmente um poliol, pode ser utilizado diretamente sem a necessidade de tratamento químico prévio (ALVES *et al.,* 2021).

Silva *et al.* (2021) conduziram um estudo comparando três diferentes tipos de adesivos na fabricação de painéis com partículas de eucalipto e pinus. Duas resinas eram de poliuretano derivado do óleo de mamona, fornecidas por empresas diferentes, enquanto a terceira era ureia-formaldeído. Os painéis fabricados com PUR,

independentemente da fornecedora, apresentaram os maiores valores de módulo de ruptura e menor inchamento em 24 horas, superando os painéis feitos com UF.

Sugahara *et al.* (2018) analisaram o uso de poliuretano derivado do óleo de mamona e ureia-formaldeído na produção de painéis com bagaço de cana-de-açúcar e eucalipto. Os painéis foram prensados a 5 MPa, por dez minutos, a 100 °C, utilizando 10% de PUR na massa total. Os resultados indicaram que as propriedades físicas e mecânicas dos painéis com adesivo PUR foram superiores às dos fabricados com UF.

Cazella (2022) avaliou a possibilidade de substituir parcialmente as partículas de pinus por partículas de polietileno tereftalato (PET) aglutinadas com PUR. Os painéis foram fabricados com densidade nominal de 0,7 g/cm³, prensados a 5 MPa e 110 °C, por dez minutos. Misturas contendo 50% de pinus, 50% de PET e 10% de PUR apresentaram desempenho superior aos requisitos das normas ABNT NBR 14810-2 (2018) e ANSI A208.1 (2016).

Diversas pesquisas, com o objetivo de produzir materiais sustentáveis e ecoeficientes, têm utilizado o adesivo PUR na fabricação de painéis aglomerados. Entre os trabalhos mais recentes destacam-se os de Herradon (2023), Cazella (2022), Rodrigues (2022), Souza *et al.* (2022), Trevisan (2021), Bispo (2021), Gilio (2020), Oliveira (2019), Sugahara (2018), Buzo (2018), Minillo (2017) e Rocha (2016).

2.5 POLÍMEROS PLÁSTICOS

Os polímeros plásticos, de origem sintética, são formados por macromoléculas compostas por unidades estruturais repetitivas conhecidas como monômeros. A união desses monômeros, que resulta na formação de polímeros, ocorre por meio de um processo químico denominado polimerização (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005; CALLISTER *et al.,* 2020). A utilização de matérias-primas como petróleo e gás natural, associada a processos industriais, tem contribuído para a produção em larga escala de plásticos em todo o mundo (GACHTER, 2017; CALLISTER *et al*., 2020).

Callister *et al.* (2020) classificam os polímeros em:

- **Termofixos**: tornam-se rígidos durante o processo de formação e não se liquefazem ao serem aquecidos, o que os torna não recicláveis.
- **Termoplásticos**: amolecem ao serem aquecidos e solidificam ao serem resfriados, permitindo ciclos repetidos, o que os torna recicláveis.

Devido à resistência, impermeabilidade, durabilidade, maleabilidade e baixo custo, os plásticos possuem uma ampla gama de aplicações (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005). Segundo o Sindicato da Indústria de Material Plástico (SINDIPLAST, 2020), os polímeros mais utilizados incluem materiais amplamente aplicados em embalagens, filmes, sacolas e recipientes, como:

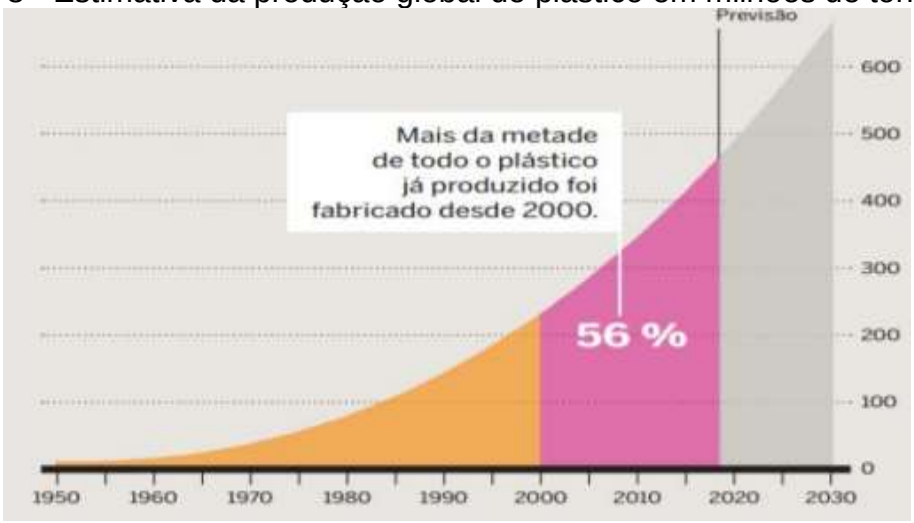
- **Polietileno Tereftalato (PET)**;
- **Polietileno (PE)**;
- **Polipropileno (PP)**;
- **Policloreto de Vinila (PVC)**;
- **Poliestireno (PS)**.

De acordo com o Atlas do Plástico (2020), a produção mundial de plásticos ultrapassa 400 milhões de toneladas por ano, com embalagens representando mais de um terço desse total. A estimativa para a produção global até 2030, apresentada na Figura 8, revela dados alarmantes.

Por essas razões, é essencial monitorar o ciclo de vida dos polímeros plásticos, uma vez que representam desafios ambientais e sociais significativos, devido a:

- Consumo de recursos naturais finitos;
- Emissões de gases de efeito estufa;
- Impactos ambientais negativos;
- Geração de resíduos, tanto no processo de fabricação quanto no pós-consumo.
-

Figura 8 - Estimativa da produção global de plástico em milhões de toneladas



Fonte: Atlas do Plástico (2020)

Tcharkhtchi *et al*. (2019) dividem o ciclo de vida dos polímeros em cinco etapas:

- **Início**: extração das matérias-primas, como petróleo, gás natural e carvão. Essa etapa gera impactos ambientais negativos, incluindo degradação da natureza e emissão de gases poluentes.
- **Processos químicos**: síntese das substâncias extraídas das matérias-primas por meio da polimerização. Esta fase consome energia, gera resíduos químicos e emite gases poluentes.
- **Fabricação**: envolve processos como moldagem, extrusão e injeção para obtenção de produtos, como garrafas, embalagens e sacolas. Esse estágio consome energia, água e produtos químicos, além de gerar resíduos e emitir gases poluentes.
- **Uso**: durante o uso dos produtos plásticos, ocorre a liberação de substâncias químicas nocivas e a geração de resíduos.
- **Descarte**: os plásticos podem ser descartados por reciclagem, incineração ou em aterros sanitários. Cada uma dessas formas de descarte provoca impactos ambientais, como a geração de resíduos, emissão de gases e contaminação do solo e da água.

O Atlas do Plástico (2020) indica que 40% dos plásticos são descartados com menos de um mês de uso. Embora esses materiais sejam recicláveis, a cadeia de reciclagem não acompanha o volume crescente de resíduos. Estima-se que 8 milhões de toneladas de plásticos foram descartadas nos oceanos (WWF, 2020).

Em 2020, o Brasil produziu aproximadamente 11,3 milhões de toneladas de plástico, com uma média de 1 quilo de lixo plástico gerado por habitante a cada semana, posicionando o país em 4º lugar no ranking mundial dos maiores produtores de resíduos plásticos, atrás apenas dos Estados Unidos, China e Índia (WWF, 2020). Do total de resíduos plásticos gerados no Brasil, 10,3 milhões de toneladas foram coletadas, mas apenas 145 mil toneladas foram recicladas (WWF, 2020). A Tabela 2 apresenta a produção e reciclagem de plásticos nos principais países consumidores.

Tabela 2 - Produção, incineração e reciclagem de plástico no mundo

Pais	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 (2020)

É necessária uma conscientização sobre a necessidade de se reduzir o uso de plásticos, sua descartabilidade e promover um sistema de reciclagem efetivo. Os governos, as empresas e as comunidades são responsáveis por encontrar soluções eficientes, estabelecer leis restritivas, implementar políticas de gestão de resíduos, fomentar a economia circular e criar produtos alternativos sustentáveis.

2.5.1 Polietileno Tereftalato

No final da Segunda Guerra Mundial, em 1941, os químicos ingleses John Rex Whinfield e James Tennant Dickson desenvolveram um polímero plástico denominado poliéster, atualmente conhecido como polietileno tereftalato (PET), inicialmente destinado à produção de fibras têxteis. O material começou a ser utilizado na fabricação de embalagens apenas em 1973, quando a empresa Du Pont introduziu a tecnologia de sopro e injeção com bi-orientação (TEIXEIRA, 2013). Desde então, com a revolução tecnológica que impulsionou a melhoria e expansão das indústrias, o consumo de PET tem crescido exponencialmente em escala global.

No Brasil, a produção de PET teve início em 1988, primeiramente na indústria têxtil. Somente em 1993 o material passou a ser utilizado na fabricação de embalagens. O PET é amplamente empregado no setor de bebidas devido à sua capacidade de reter gases e impedir a transferência de odores, sendo considerado o mais eficiente para a fabricação de garrafas e embalagens (ABIPET, 2018).

O polietileno tereftalato (PET) é um polímero termoplástico sintético, obtido por meio de reações químicas entre o ácido tereftálico e o etilenoglicol. Este material apresenta alta resistência mecânica e física, baixo peso específico e baixa porosidade (ABIPET, 2017). Algumas das propriedades do PET estão detalhadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades físicas e mecânicas do PET

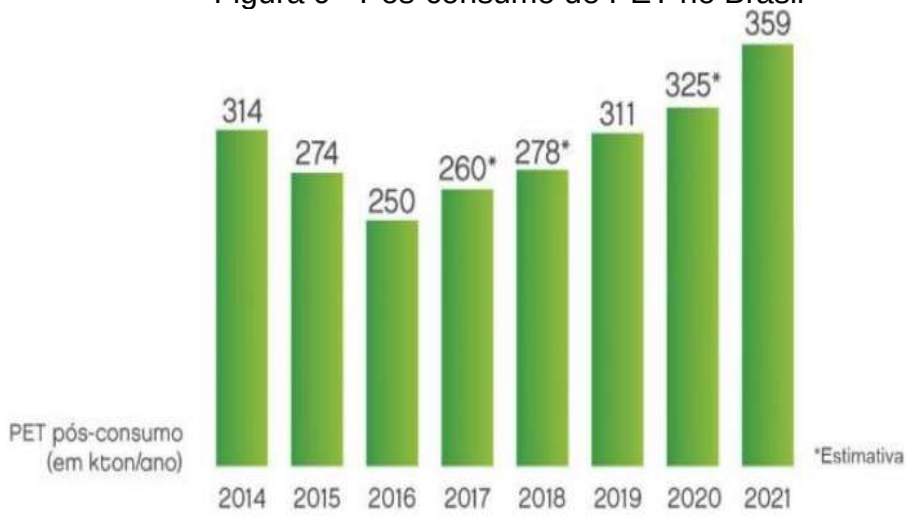
Massa Específica (g/cm³)	Temp. de Fusão – Tm (°C)	Temp. de Transição Vítrea – Tg (°C)	Resistência à tração (MPa)	Módulo à tração (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo à flexão (MPa)	Absorção de água (% - 24h)
1,34 –1,39	265	69 – 115	58,6 – 72,4	2758 – 4136	96,5 – 124,1	2413 – 3102	0,1 – 0,2

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

Zoch (2013) destaca que os danos ambientais causados para atender às demandas do mercado, aliados à falta de controle no descarte de embalagens de PET, contribuíram para um desastre ambiental de escala global. Esse cenário é agravado pelo fato de o PET ser um polímero não biodegradável, demandando um período indefinido para iniciar seu processo de decomposição (HERRADON, 2023).

De acordo com o 12º Censo da Reciclagem do PET no Brasil, realizado pela ABIPET em 2022 (Figura 9), aproximadamente 359 mil toneladas de embalagens de PET pós-consumo foram destinadas à reciclagem, representando um aumento de 15,4% em relação ao volume registrado em 2019, quando 311 mil toneladas foram recicladas. Entretanto, apesar das diversas aplicações viáveis para a reciclagem de PET, cerca de 45% das embalagens não recicladas possivelmente tiveram destinos inadequados, sendo descartadas em aterros sanitários, incineradas – contribuindo para a poluição do ar – ou abandonadas no meio ambiente, agravando os impactos ambientais (ABIPET, 2020).

Figura 9 - Pós-consumo de PET no Brasil



Fonte: Adaptado de ABIPET (2022)

Diante desse cenário alarmante, a reciclagem de resíduos pós-consumo para a confecção de novos materiais apresenta-se como uma alternativa eficaz para mitigar os impactos negativos causados pelo PET, além de agregar valor a um material amplamente descartado (RODRIGUES *et al*., 2017; FONSECA *et al*., 2014).

Com o intuito de viabilizar o uso de materiais alternativos que sejam abundantes, de baixo custo e sustentáveis, diversos estudos (HERRADON, 2023; CAZELLA, 2022; SILVA *et al*., 2021; STARK *et al*., 2021; HERNÁNDEZ *et al.,* 2020; ABREU *et al*., 2018) exploraram a aplicação do PET na produção de painéis aglomerados. Esses trabalhos buscam não apenas mitigar os impactos ambientais e reduzir o volume de resíduos, mas também transformar esses materiais em produtos de maior valor agregado.

2.5.2 Painéis aglomerados com PET reciclado

As pesquisas mais recentes têm buscado melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis aglomerados com o uso de resíduos, uma abordagem que ganha ainda mais relevância ao tratar de materiais residuais, que representam grandes desafios para a sociedade moderna. A utilização de polietileno tereftalato (PET) em compósitos de madeira-plástico, conhecidos como WPC (*Wood Plastic Composites*), tem sido amplamente investigada nos últimos anos.

Os compósitos de madeira-plástico podem ser classificados em dois tipos, conforme a concentração de termoplástico:

- **Elevada concentração de termoplástico**: contém menos de 60% de madeira em massa, com o PET atuando como matriz e a madeira como reforço.
- **Baixa concentração de termoplástico**: menos de 30% de madeira em massa, onde o termoplástico não atua como matriz, mas como ligante para as fibras lignocelulósicas, de forma semelhante aos aglutinantes usados em painéis convencionais como MDP, MDF e OSB (STARK *et al.*, 2021).

Esses compósitos podem ser fabricados por processos de extrusão, injeção ou compressão em alta temperatura. O uso de materiais lignocelulósicos residuais e o reaproveitamento de termoplásticos na produção de compósitos por prensagem plana com calor têm sido objeto constante de estudos em todo o mundo (LOPEZ *et al*., 2020; DHARMARATNE *et al*., 2021; CHOTIKHUN *et al*., 2022).

Devido às suas propriedades, como a redução na absorção de água e o aumento na resistência mecânica dos painéis, pesquisadores identificaram o PET como um substituto potencial para a madeira em painéis aglomerados (HERRADON, 2023; CAZELLA, 2022; LOPEZ *et al*., 2020).

Herradon (2023) desenvolveu painéis aglomerados com partículas de resíduos de pinus provenientes da indústria moveleira, substituindo parte dessas partículas por PET nas proporções de 70/30 e 50/50. Os painéis utilizaram adesivo PUR em concentrações de 5%, 10% e 15%. Para referência, também foram produzidos painéis com 100% de partículas de pinus nas mesmas concentrações de PUR. As partículas foram secas até 4% de umidade, com densidade nominal dos painéis de 0,550 g/cm³, prensagem a 5 MPa, temperatura de 110 °C e duração de 10 minutos. As propriedades físicas e mecânicas foram avaliadas conforme as normas ABNT NBR 14810-2 (2018) e ANSI A208.1 (2016).

Os resultados indicaram que as misturas com 30% e 50% de PET, combinadas com 15% de PUR, apresentaram melhor envelopamento das partículas, resultando em menor número de vazios. Os painéis referência não atenderam às classificações normativas. Dentre as misturas, os painéis 50/50 com 15% de PUR obtiveram os melhores resultados físicos e mecânicos, seguidos pelas misturas 50/50 com 10% de PUR e 70/30 com 15% de PUR. Herradon concluiu que os painéis com resíduos de

móveis e PET aglutinados com PUR apresentaram desempenho satisfatório e atendiam aos requisitos normativos, promovendo o desenvolvimento sustentável.

Cazella (2022) produziu painéis utilizando partículas de *Pinus elliottii* e PET nas proporções de 70/30 e 50/50, com adesivo PUR em concentrações de 5% e 10%. As partículas foram secas até 3% de umidade e os painéis apresentaram densidade de 0,7 g/cm³, sendo prensados a 5 MPa, 110 °C, por 10 minutos.

Os resultados demonstraram que a mistura 50/50 com 10% de PUR proporcionou um aumento de 65,64% na resistência à elasticidade (MOE) em comparação com o painel referência sem PET. Essa mistura também apresentou maior resistência à flexão (MOR) e tração perpendicular (TP), além de redução na absorção de água e menor inchamento em espessura após 24 horas. Com o uso de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi observado que a mistura 50/50 com 10% de PUR apresentou melhor envelopamento das partículas e menor presença de vazios. Cazella concluiu que a incorporação de PET contribuiu para melhorias nas propriedades gerais dos painéis, além de benefícios ambientais e econômicos, alinhando-se aos objetivos do desenvolvimento sustentável.

Rahman *et al.* (2013) fabricaram compósitos de madeira-plástico utilizando serragem e PET em proporções de 40/60, 50/50, 60/40 e 70/30, sem adesivos aglutinantes. A prensagem foi realizada a 5 MPa e 190 °C por 25 minutos. Os resultados indicaram que o aumento na proporção de PET reduziu a absorção de água em 15,7% e o inchamento em 4,3%, além de melhorar o MOE e MOR.

Em um estudo posterior, Rahman *et al.* (2018) utilizaram partículas de madeira (*Albizia richardiana King & Prain*) e PET em proporções semelhantes, variando as dimensões das partículas. A maior densidade dos compósitos foi observada com partículas de madeira entre 0,5 e 1,0 mm, enquanto as misturas com partículas maiores apresentaram menor absorção de água e inchamento após 24 horas. A proporção 50/50 foi considerada a mais tecnicamente viável.

Embora estudos tenham explorado o uso de partículas de PET em painéis aglomerados, ainda não há relatos de pesquisas que combinem partículas de resíduos pós-consumo de móveis com PET. Isso representa uma lacuna científica com potencial para inovações no setor de materiais sustentáveis.

2.6 PRODUTOS RESINOSOS

Na Desde a antiguidade, a resina desempenha um papel fundamental em diversas culturas, sendo amplamente utilizada devido às suas propriedades versáteis. Na Grécia, era incorporada na composição de vinhos; no Egito, servia para a mumificação de corpos; enquanto fenícios e romanos a empregavam no calafeto de navios, na impermeabilização de cordas e tecidos e como combustível para tochas (HOMA, 1983). Com o desenvolvimento das civilizações, suas aplicações foram se expandindo, impulsionadas pelo conhecimento acumulado ao longo dos séculos. No século XVII, a destilação da resina já era uma prática consolidada, destacando-se a Suécia como um dos principais exportadores, com um volume de 22.000 toneladas exportadas em 1637 (LIMA, 1996).

No Brasil, a exploração da resina acompanhou o crescimento da atividade florestal, que ganhou força entre as décadas de 1960 e 1980. Nesse período, incentivos fiscais estimularam o cultivo de extensas áreas homogêneas de espécies exóticas de rápido crescimento, como *Pinus* e *Eucalyptus*, consolidando o país como um dos maiores exportadores de papel, celulose e outros derivados da madeira (NEVES et al., 2001). A introdução comercial do *Pinus* foi conduzida pelo Instituto Nacional do Pinho, com o objetivo de abastecer as indústrias de celulose, madeira serrada e energia, fortalecendo a cadeia produtiva e impulsionando o setor florestal.

Entre os derivados da madeira, destacam-se gomas, resinas e extratos, os quais apresentam ampla aplicabilidade industrial. O *Pinus*, além de ser uma importante matéria-prima para a produção de celulose, madeira comercial e carvão, configura-se como uma fonte estratégica de resina para o setor florestal (SALVADOR, 2019). A resina bruta caracteriza-se como um material inflamável, translúcido e com alto teor de terebintina, apresentando odor intenso, viscosidade elevada e fluidez em estado líquido. Além disso, é insolúvel em água e álcool etílico (RODRIGUES, 2015).

A resinagem, embora seja uma prática frequentemente secundária em plantações destinadas a outras finalidades, ocorre predominantemente em coníferas, devido ao seu alto teor de resina, especialmente no gênero *Pinus*. Em contraste, árvores folhosas possuem um teor inferior a 1% desse composto (BRITO; BARRICHELO, 1978). Segundo Lima (1996), os produtos resinosos podem ser obtidos por três métodos principais:

- **Goma-resina ou resina natural**: extraída por exsudação da resina de árvores vivas, seguida de lavagem e destilação.
- **Talóleo**: subproduto do processo sulfato na transformação da madeira em celulose.
- **Resina de madeira**: obtida por meio de processos tecnológicos de secagem e separação dos componentes resinosos presentes na madeira.

A resinagem possui grande relevância econômico-social no Brasil, conforme apontado pela ARESB (2024). Introduzida na década de 1970 com o *Pinus elliottii*, essa atividade enfrentou um desenvolvimento limitado devido à predominância da indústria papeleira e madeireira, bem como à escassez de investimentos e de tecnologias voltadas para a extração da resina (LIMA, 1996). Atualmente, a produção concentra-se principalmente nas seguintes espécies:

- ***Pinus elliottii*** (espécie com maior produção de resina);
- ***Pinus caribaea****;*
- ***Pinus palustris****;*
- ***Pinus pinaster****;*
- ***Pinus sylvestris*** (LIMA, 1996).

Os produtos resinosos possuem ampla aplicação na indústria química, sendo insumos essenciais para a formulação de diversos produtos. A diversidade de usos dificulta a definição de uma aplicação principal, uma vez que esses compostos são empregados em setores que vão desde a adesivação até a fabricação de tintas e vernizes (FERREIRA, 2001).

A produção de goma-resina ilustra a estratégia de uso múltiplo das florestas, permitindo a diversificação das atividades econômicas e a otimização do aproveitamento das árvores. Esse processo envolve pequenos produtores, promove o manejo sustentável de áreas plantadas e contribui para a conservação florestal e o reflorestamento. No entanto, seu pleno desenvolvimento exige investimentos contínuos e avanços tecnológicos (SALVADOR, 2019).

Ao longo dos anos, as técnicas de resinagem foram aprimoradas, visando à redução de custos, ao aumento da produtividade por árvore e à melhoria da qualidade dos produtos derivados (RODRIGUES, 2015). Ainda assim, o setor enfrenta desafios significativos, especialmente em relação à baixa divulgação da atividade e à escassez

de investimentos, fatores que limitam sua expansão e o pleno aproveitamento do potencial econômico da resina no Brasil.

2.6.1 Resina de *Pinus* - Breu

O breu é um sólido transparente, de aparência vítrea e quebradiça, livre de impurezas e com características físico-químicas variáveis, como acidez e insolubilidade em água. Embora insolúvel em água, pode ser dissolvido em determinados solventes orgânicos (FERREIRA, 2001). Sua composição é predominantemente formada por ácidos resínicos, mas também contém ácidos graxos, ésteres, esteróis e álcoois (CAETANO, 2019).

O método de resinagem em árvores vivas é responsável por 64% da produção mundial de breu. Desse processo derivam denominações como breu vivo, colofônia, pez ou *gum rosin* (RODRIGUES, 2015). O breu se destaca por ser uma matéria-prima natural, renovável e não poluente, características que conferem a ele um valor estratégico para o Brasil, que possui clima e solos favoráveis à sua produção (NAVAL STORE, 2000; SALVADOR, 2019).

Lima (1996) observa que, no passado, a resina extraída no Brasil era considerada de baixa qualidade devido à falta de investimentos e de tecnologias adequadas para sua extração, o que dificultava a competitividade no mercado global. Contudo, atualmente, a resina brasileira é reconhecida como uma das melhores do mundo. A China é o maior produtor e exportador mundial de breu, com uma resina caracterizada por sua elevada dureza, semelhante ao breu produzido nos trópicos (LIMA, 1996).

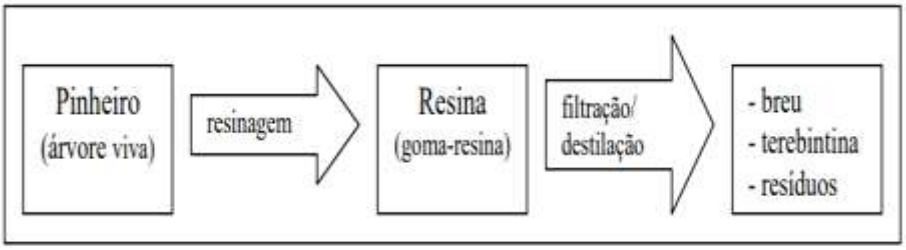
Uma das formas de classificação do breu é pela cor:

- **Breu mais claro**: indica maior qualidade.
- **Breu mais escuro**: indica menor qualidade (RODRIGUES, 2015).

O processo de obtenção do breu ocorre em duas etapas principais (**Figura 10**):

- **Resinagem**: extração da resina de árvores vivas.
- **Filtração e destilação**: processo que gera breu (60 a 85%), terebintina (15 a 30%) e resíduos compostos por água, folhas e cascas, que não possuem utilidade aparente (FERREIRA, 2001).

Figura 10 - Fases da obtenção do breu



Fonte: FERREIRA (2001)

O breu é usado na indústria de tintas, vernizes, cola para papel, na produção de plásticos, lubrificantes, adesivos, borracha sintética, tintas de impressão, graxas, esmaltes, cosméticos, sabões, detergentes, chicletes, explosivos, isolantes térmicos etc. Se destacando como matéria-prima indicada para as colas termo-estabilizadas, que são usadas na indústria de móveis (NEVES *et al*, 2001).

2.6.2 Painéis aglomerado feitos com Breu

Os adesivos desempenham um papel crucial no setor madeireiro, especialmente na produção de móveis. Por essa razão, têm sido amplamente pesquisados para aprimoramento e para a identificação de materiais que contribuam para aumentar sua eficiência. Os agentes aditivos, cuja principal função é melhorar a qualidade dos painéis, apresentam grande potencial para desenvolvimento a partir de matrizes naturais e recicláveis. Nesse contexto, um dos maiores desafios da ciência é transformar resíduos e subprodutos em materiais de maior valor agregado, capazes de melhorar as propriedades dos produtos.

Entre os produtos naturais, o breu destaca-se como um material de grande interesse. Utilizado desde os primórdios como cola e impermeabilizante, o breu é derivado da resina de coníferas, um dos principais segmentos da indústria florestal.

Spier (2024) desenvolveu compósitos com matriz de polietileno de baixa densidade (PEDBD) pós-industrial, reforçados com fibras de *Pinus* e incorporados com breu. O objetivo foi promover a reciclagem desses resíduos e criar um material com valor agregado para aplicações no setor moveleiro. Foram avaliados dois agentes aglutinantes: polietileno linear de baixa densidade *graftizado* com anidrido maleico (PELBD-g-AM) e a resina natural breu.

As partículas de *Pinus* foram secas a 60 °C por 24 horas. As proporções avaliadas incluíram 100% de PEDBD; 70/30 (PEDBD/*Pinus*) sem agente de acoplamento, com processamento de 5 e 10 minutos; e 67/30 (PEDBD/*Pinus*) com 3% de agente de acoplamento, utilizando PELBD-g-AM ou breu, também com tempos de 5 e 10 minutos, totalizando sete amostras. Os materiais foram misturados em câmara interna a 160 °C, com 60 rotações por minuto, e posteriormente processados em uma injetora a 190 °C (cilindro) e 40 °C (matriz), sob pressão de 400 bar. As amostras foram avaliadas conforme as normas ASTM D638, ASTM D256, ASTM D-1238 e ASTM 724.

Os resultados indicaram que os compósitos com breu apresentaram aumento no módulo de elasticidade e maior índice de fluidez em comparação com as demais amostras, sugerindo sua viabilidade como agente de fluxo em polímeros. No entanto, apresentaram menor resistência à tração e temperaturas mais baixas de degradação térmica, segundo análise TGA. Apesar das limitações, a incorporação de breu mostrou-se promissora, com resultados favoráveis em algumas propriedades.

Moretto *et al*. (2020) produziram placas de isolamento termoacústico utilizando casca de coco e três tipos de aglutinantes: breu, éster de breu e resina hidrocarbônica. As proporções de resina utilizadas foram de 25% e 40%, aplicadas a 210 gramas de fibras de coco, que foram previamente secas até atingir umidade de 10% a 12%. As fibras longas, com comprimento médio de 152 mm e diâmetro médio de 0,25 mm, foram depositadas sobre uma matriz quadrada aquecida, e a resina foi espalhada uniformemente. A prensagem ocorreu por 12 minutos sob carga de 10 kgf/cm².

Os compósitos com 40% de éster de breu apresentaram os melhores resultados, com absorção de água de 4,3% após 2 horas e 9% após 24 horas. A análise microscópica revelou que a resina foi eficiente em inibir a passagem de água. O índice de condutividade térmica indicou uma redução de 28 decibéis na transmissão sonora em comparação com caixas sem isolamento, demonstrando potencial para aplicação como isolante termoacústico.

Cunha (2019) produziu chapas de aglomerado com partículas de bagaço de cana-de-açúcar aglutinadas com fécula de mandioca e amido de arroz, posteriormente impregnadas com breu líquido após aquecimento. O bagaço foi triturado até obter fibras de 8 mm e seco a 60 °C por 24 horas. A fécula e o amido foram transformados em goma por meio de cozimento, à qual as fibras de cana foram adicionadas e

homogeneizadas. A mistura foi moldada e compactada a 70 °C sob pressão de 10 bar por 10 minutos, seguida por secagem em estufa a 100 °C por 24 horas.

O breu, moído e derretido, foi aplicado como agente impermeabilizante, criando uma camada vítrea na superfície dos painéis. Embora os produtos tenham apresentado baixa resistência mecânica e não fossem adequados para aplicações estruturais, foram classificados como painéis de baixa densidade, indicados para uso em decoração e preenchimentos. O breu atuou como um impermeabilizante eficaz, alinhando-se à proposta sustentável do projeto.

Lourençon *et al.* (2016) produziram painéis com partículas de *Pinus taeda* aglutinadas com lignina kraft e breu. As partículas foram aclimatadas por dois meses em condições controladas (65% de umidade, 20 °C). Foram formuladas quatro proporções: uma com lignina, outra com breu e duas misturando ambos, nas proporções de 20% e 80%. A prensagem ocorreu a quente, sob pressão de 1,5 tonelada, a 85 °C, durante 15 minutos. Os painéis foram avaliados conforme as diretrizes da ASTM D905-08.

Os resultados indicaram que tanto a lignina quanto o breu, isoladamente, apresentaram potencial como adesivos naturais. Contudo, os compósitos com misturas de lignina e breu mostraram resultados inferiores de resistência ao cisalhamento na linha de cola em comparação aos adesivos utilizados separadamente.

2.7 RESÍDUOS PÓS-CONSUMO

Observa-se uma tendência crescente ao exagero no comportamento dos consumidores, impulsionada por necessidades cada vez mais imediatistas, desejos efêmeros e a ampla disponibilidade de recursos para satisfazer as inquietações humanas (PIMENTA, 2011). O comportamento de consumo na sociedade moderna pode ser simplificado nas seguintes etapas:

- **Aquisição**;
- **Consumação**;
- **Descarte**;
- **Nova aquisição** (BURGO, 2012).

A Figura 11, adaptada de Meireles (2018), ilustra o fluxo típico seguido pelo consumidor no processo de compra e descarte de um produto. Nesse modelo, identifica-se que o ciclo de consumo geralmente se inicia com o surgimento de uma necessidade. O consumidor busca informações sobre produtos que possam atendê-la, realiza uma avaliação prévia e, caso haja compatibilidade entre as expectativas e as características do produto, efetua a compra. Após o consumo, ocorre uma análise comparativa entre o desempenho do produto e as promessas feitas durante sua aquisição. Quando o produto deixa de atender às expectativas ou interesses, é descartado, reiniciando o ciclo.

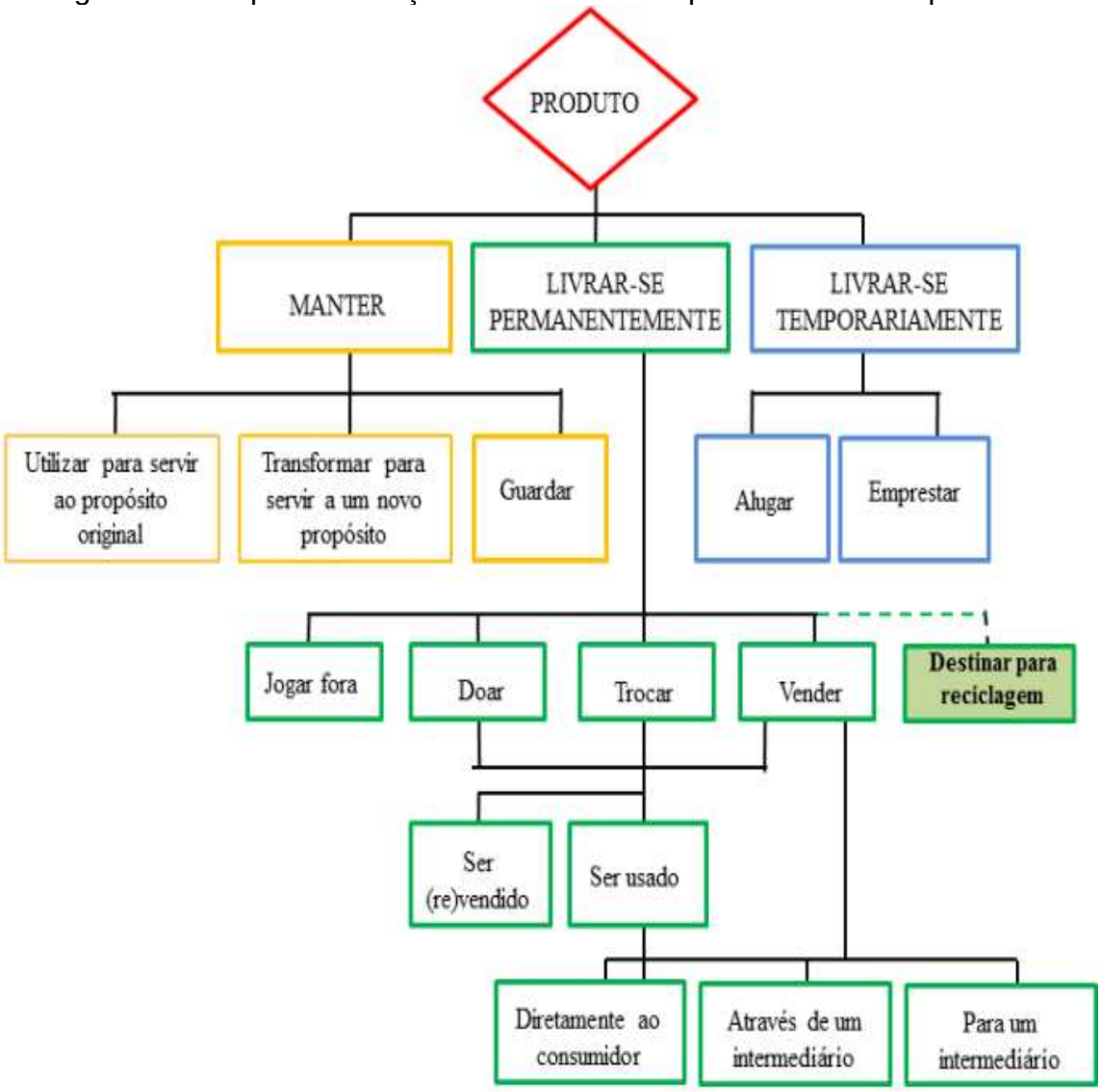
Figura 11 - Fluxograma do Processo de Necessidade até o Descarte

Fonte: MEIRELES (2018)

Como resultado, o consumismo exagerado e o descarte de produtos aumentam cada vez mais. No entanto, após o despertar de alguns consumidores sobre os efeitos nocivos dos materiais descartados e da extração contínua de recursos naturais finitos, o problema dos resíduos foi ganhando notoriedade (MEIRELES, 2018).

Na Figura 12 Meireles demonstra a ampla gama de possibilidades que o consumir tem após adquirir um produto, mas o caminho mais utilizado é o de livrar-se permanentemente jogando o produto fora. Impulsionada pelo capitalismo, que marca a sociedade contemporânea, a descartabilidade oferece praticidade e conveniência disfarçando o desperdício e o esbanjamento de recursos, que geram grandes danos ao meio ambiente (SOLOMON, 2002).

Figura 12 - As possíveis ações do consumidor para descarte de produtos



Fonte: MEIRELES (2018)

Os países, especialmente os desenvolvidos, têm demonstrado crescente preocupação com a conscientização dos consumidores em relação à reciclagem, à responsabilidade de quem produz e consome produtos, e às consequências dos resíduos para a natureza e a sociedade (SOLOMON, 2002). Essa preocupação com os danos causados pelos resíduos sólidos levou muitas nações a investirem em tecnologias de reciclagem. Destinar adequadamente os resíduos é um ato de cidadania (SOLOMON, 2002).

A educação socioambiental desempenha papel fundamental ao fornecer acesso à informação e construir uma sociedade consciente e sustentável. O método mais eficaz para proteger o meio ambiente é incentivar os consumidores a

repensarem seus hábitos de consumo, conscientizando-os sobre os problemas sociais e ambientais ao seu redor (GOMES, 2006). Sem uma mudança nos valores que orientam a sociedade, promovida por meio de uma educação ambiental sólida, não será possível alcançar os objetivos do desenvolvimento sustentável.

A fabricação de móveis no Brasil utiliza uma ampla variedade de materiais. Além da madeira, são empregados metais, plásticos e até vidros, conforme o tipo de mobiliário desenvolvido (RODRÍGUEZ *et al.,* 2018). Entretanto, essa diversidade gera uma enorme quantidade de resíduos sólidos, sendo o estado de São Paulo o maior gerador desses resíduos (IBGE, 2015). Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2016), a geração de resíduos sólidos no Brasil aumentou significativamente ao longo dos anos: de 53 milhões de toneladas em 2008 para aproximadamente 78,3 milhões de toneladas em 2016.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010) instituiu a gestão compartilhada dos resíduos, atribuindo responsabilidades ao poder público, à indústria e aos consumidores. Cabe ao consumidor realizar a separação segmentada dos resíduos em papel, plástico, metal e vidro, depositando-os em locais adequados ou sinalizados como pontos de coleta.

A reciclagem e o reaproveitamento de resíduos são temas amplamente discutidos em escala global. Cada vez mais, projetos sustentáveis são desenvolvidos visando economia de energia, baixo impacto ambiental e a utilização de materiais alternativos. Contudo, no Brasil, a maioria dos resíduos provenientes da indústria moveleira ainda é destinada a aterros sanitários (MEIRELES, 2018).

A utilização de resíduos moveleiros, além de contribuir para a preservação dos recursos naturais, pode ser considerada um diferencial competitivo no mercado. Atualmente, há uma crescente demanda por produtos que considerem aspectos sociais, ambientais e econômicos, o que pode favorecer o sucesso comercial de produtos elaborados com resíduos (MEIRELES, 2018). Para alcançar esses objetivos, é necessário investir em uma base científica sólida para o desenvolvimento de novos materiais, processos e usos para matérias-primas incomuns, garantindo sua adequação a futuros projetos, design, economia e gestão.

2.7.1 Painéis feitos com resíduos pós-consumo

O aproveitamento de produtos de madeira no final do ciclo de vida para a produção de painéis ainda é pouco realizado, apesar de representar uma fonte promissora de matéria-prima (ZAMARIAN, 2017). Essa prática torna-se ainda mais relevante devido aos descartes frequentes, impulsionados por novos lançamentos e tendências. Nos últimos anos, pesquisas têm explorado o potencial de resíduos de madeira para a fabricação de painéis aglomerados (HERRADON, 2023). Mickleburgh e Magin (2003) destacam as vantagens do reprocessamento de resíduos de móveis, embalagens e madeira de demolição para a produção de painéis de partículas.

As partículas obtidas a partir de móveis descartados podem ser originadas de diversos materiais, como:

- **MDF**;
- **MDP**;
- **Aglomerados**.

Essas placas possuem características distintas, incluindo variações de densidade, determinadas pelas espécies de madeira utilizadas na produção inicial. Além disso, são painéis que passaram por processos de prensagem em altas temperaturas e contêm resina polimerizada e parafina (ZAMARIAN, 2017).

Pesquisas sobre móveis pós-consumo frequentemente visam o reaproveitamento energético por meio da calcinação dos resíduos, sem considerar os impactos negativos ao meio ambiente e à sociedade (PRIOLI *et al.,* 2018). Nesse sentido, torna-se essencial explorar alternativas que contribuam para o desenvolvimento sustentável.

Prioli *et al.* (2018) desenvolveram compósitos com MDF reprocessado a partir de resíduos de chapas de MDF cru, cortadas a laser. As partículas foram processadas em moinho de facas até se tornarem homogêneas e submetidas a dois processos: uma mistura de resíduos com resina poliéster e outra com tratamento químico de mercerização. As partículas passaram por secagem em estufa a 120 °C por uma hora, e as submetidas à mercerização foram imersas em solução de NaOH 10%, lavadas com água destilada e novamente secas. Após homogeneização, as misturas foram moldadas, submetidas à prensagem mecânica manual por 2 horas e avaliadas conforme as normas ASTM D-7264, ASTM D-3039 e ASTM D-256.

Os resultados indicaram que tanto o MDF com mercerização (tratamento alcalino utilizando NaOH para modificações em fibras naturais, no qual promove um aumento na rugosidade da superfície da fibra através da ruptura das ligações de hidrogênio na estrutura da rede, auxiliando no mecanismo de ancoragem mecânico com a matriz), quanto o sem apresentaram maior tensão à flexão em comparação ao MDF padrão comercial. Contudo, a mercerização não demonstrou vantagens significativas em termos de desempenho mecânico. Nenhuma das amostras reprocessadas apresentou resistência ao impacto semelhante à do MDF comercial.

Zamarian *et al.* (2017) produziram painéis aglomerados com partículas de móveis descartados, puras ou misturadas com partículas industriais de *Pinus*. Os materiais processados incluíam armários, gavetas, tampos de mesa, entre outros. Após trituração industrial, as proporções analisadas foram de 10%, 25%, 50% e 75% de partículas de móveis descartados, além de painéis de referência com 100% de móveis descartados e 100% de *Pinus*.

Os painéis, com densidade nominal de 0,70 g/cm³, foram fabricados com resina ureia-formaldeído (10% em relação à massa), prensados a 4 MPa, 140 ºC, por 10 minutos, e avaliados conforme normas EN 310, EN 312, EN 317, EN 319, EN 323 e NBR 14810-3.

Os resultados mostraram que as partículas de móveis descartados apresentaram densidade inferior às de *Pinus*, mas sem influência significativa nas propriedades dos painéis. As propriedades físicas e mecânicas atenderam aos padrões normativos, exceto para MOE e MOR em painéis com 75% de partículas de móveis descartados. A pesquisa demonstrou a viabilidade técnica do uso integral de partículas de móveis descartados na produção de painéis aglomerados.

Weber e Iwakiri (2015) investigaram painéis aglomerados produzidos com resíduos de MDF, MDP e compensados, utilizando resina ureia-formaldeído em proporções de 6% e 10%. As misturas incluíram 100% de cada material, 50/50 entre dois materiais e 33/33/33 entre os três, totalizando 10 tratamentos.

Os resultados, avaliados conforme normas EN 310, EN 312, EN 317, EN 319, EN 323 e NBR 14810-3, indicaram que apenas os painéis de MDP tiveram densidade aumentada conforme o teor de resina. A parafina incorporada reduziu os valores de inchamento. Embora a redução do teor de resina de 10% para 6% tenha afetado

negativamente as propriedades mecânicas, a maioria dos tratamentos atendeu aos requisitos normativos mínimos.

Weber e Iwakiri (2015) concluíram que a utilização de resíduos de MDF, MDP e compensados, tanto de forma pura quanto misturada, é tecnicamente viável para a produção de painéis aglomerados. Esse reaproveitamento apresenta benefícios econômicos e ambientais significativos.

3 SÍNTESE DA REVISÃO

Conforme demonstrado nas referências literárias, o tipo de material utilizado como partícula influencia diretamente as características dos painéis aglomerados, especialmente a densidade das partículas, que afeta o fator de compactação e, consequentemente, a densidade dos painéis produzidos.

Os atributos físicos e mecânicos dos painéis são significativamente impactados pelo adesivo, um componente essencial no processo de fabricação. Embora os adesivos à base de formol estejam consolidados no mercado, muitos estudos têm focado no desenvolvimento de alternativas sustentáveis, visando substituir os adesivos tóxicos por opções provenientes de fontes naturais e renováveis.

A inclusão de aditivos em painéis aglomerados é outra prática em destaque nas pesquisas atuais. Com o mercado buscando constantemente alternativas mais econômicas, a aditivação com materiais reciclados apresenta um futuro promissor, permitindo a melhoria da qualidade dos painéis por meio do uso de resíduos.

Nesse contexto, a utilização de resíduos pós-consumo, como móveis descartados, para substituir as partículas de madeira nos painéis, surge como uma solução alinhada a dois princípios fundamentais: a reciclagem e a economia circular. A incorporação de um adesivo não poluente e renovável agrega valores sustentáveis aos painéis, características cada vez mais valorizadas pelos consumidores.

O breu e o PET despontam como elementos promissores para a melhoria das propriedades dos painéis. O breu, sendo um produto natural, e o PET, uma matéria-prima reciclada, não apenas contribuem para o aprimoramento das características físicas e mecânicas dos painéis, mas também reforçam o compromisso com a sustentabilidade e a preservação ambiental.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo explorou a produção de painéis aglomerados homogêneos utilizando resíduos de móveis pós-consumo, destacando-se pela abordagem sustentável e pela substituição de materiais tradicionais por alternativas ecologicamente responsáveis. A pesquisa foi estruturada como um estudo experimental, visando avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis aglomerados produzidos a partir de combinações específicas de materiais. A Figura 13 ilustra o fluxo de desenvolvimento da pesquisa e pode ser resumida como:

1. **Materiais:**
- Resíduos de painéis MDP pós-consumo;
- Adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (PUR);
- Aditivos como polietileno tereftalato (PET) e breu.
2. **Preparação das Partículas:**
- Desagregação dos painéis de MDP para obtenção das partículas pós-consumo. Onde elas foram estabilizadas em teor de umidade de aproximadamente 3% e classificadas em tamanhos entre 2 mm e 6 mm.
3. **Misturas e Aglomeração:**
- Sete formulações foram desenvolvidas com diferentes proporções de partículas pós-consumo e aditivos.
- Aglutinação com 10% de PUR.
4. **Prensagem dos Painéis:**
- Parâmetros de prensagem: pressão de 5 MPa, densidade nominal de 0,5 g/cm³, temperatura de 160 °C e tempo de 10 minutos.
5. **Ensaios Físicos e Mecânicos:**
- Determinação da densidade, teor de umidade, inchamento em espessura e absorção de água.
- Avaliação do módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e resistência à tração perpendicular (TP).

A proposta de reaproveitar resíduos pós-consumo no desenvolvimento de painéis representa uma contribuição significativa para a sustentabilidade na indústria moveleira e de construção. Além de reduzir a dependência de materiais de origem florestal, o uso de adesivos e aditivos alternativos, como o poliuretano à base de óleo

de mamona e o PET reciclado, agrega valor a resíduos, promovendo uma economia mais circular e alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Figura 13 – Fluxograma da pesquisa

Fonte: autora

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS PARA PRODUÇÃO DOS PAINÉIS

4.1.1 Painéis Pós-consumo

O mobiliário de escritório descartado foi doado pela empresa Newdrop, localizada em Lins, São Paulo, Brasil. As escrivaninhas estavam condicionadas no depósito da empresa (Figura 14a). Posteriormente os mobiliários foram desmontados, tampos, gavetas e os componentes metálicos e plásticos foram removidos, Figura 14b. Apenas os painéis do tipo MDP pertencentes ao mobiliário descartado foram utilizados na pesquisa.

Figura 14 – (a) escrivaninhas no depósito e (b) os painéis separados

(a) (b)

Fonte: autora

4.1.2 Resina Poliuretana à base de Óleo de Mamona

O adesivo utilizado nesta pesquisa, resina poliuretana à base de óleo de mamona (PUR), identificado como AGT 1315, foi fornecido pela empresa IMPERVEG® Polímeros Indústria e Comércio Ltda., localizada no município de Aguaí, estado de São Paulo, Brasil. Com base nos resultados obtidos em estudos anteriores realizados por Herradon (2023), Trevisan (2021) e Gilio (2020), foi adotada a proporção de 1:1 entre o poliol e o pré-polímero para a aglutinação das partículas pós-consumo, incluindo os aditivos PET e breu.

O poliol, um líquido viscoso de coloração amarelo-clara, é derivado do óleo de rícino, também conhecido como óleo de mamona, enquanto o pré-polímero, constituído por metileno difenil diisocianato (MDI), apresenta coloração escura e é oriundo de derivados do petróleo (Figura 15).

No que diz respeito às suas propriedades, o adesivo PUR caracteriza-se pela ausência de solventes em sua composição, pela não emissão de gases tóxicos e por sua elevada resistência ao calor, suportando temperaturas de até 210 °C. Além disso, possui um tempo de secagem que varia entre 60 e 90 minutos, com cura inicial atingida em 24 horas e cura final completada em até 7 dias (IMPERVEG, 2022).

Figura 15 – Adesivo Resina Poliuretana à base de Óleo de Mamona

Fonte: autora (2024)

4.1.3 Polietileno Tereftalato

O polietileno tereftalato (PET) empregado neste estudo foi obtido a partir de garrafas de bebidas descartadas, processadas no formato de flakes, conforme ilustrado na Figura 16. Esse material foi gentilmente doado pela empresa Global PET S.A., localizada na cidade de São Carlos, estado de São Paulo, Brasil.

Ressalta-se que as partículas de PET utilizadas foram empregadas em sua forma original, sem qualquer tipo de tratamento químico adicional. O material passou apenas por um processamento mecânico para redução de tamanho, visando alcançar dimensões compatíveis com as necessidades do experimento. Esse procedimento preserva as propriedades inerentes do PET, tais como sua alta resistência térmica, mecânica e à degradação, características amplamente reconhecidas na literatura como vantajosas para aplicações em materiais compósitos e painéis particulados.

Além disso, o emprego do PET em sua forma reciclada reflete a preocupação com práticas de reaproveitamento sustentável e redução de resíduos, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que promovem o consumo responsável e a diminuição do impacto ambiental.

Figura 16 – Partículas de PET

Fonte: autora (2024)

4.1.4 Breu

O breu utilizado neste estudo trata-se de uma resina natural sólida, caracterizada por sua coloração amarelada, inflamabilidade e aspecto vítreo e quebradiço, conforme Figura 17. Quando submetido ao aquecimento, o breu passa por um processo de fusão em uma temperatura entre 90 °C e 115 °C, durante o qual sua viscosidade diminui até alcançar a secagem completa (RODRIGUES, 2015).

O material foi adquirido na empresa Velas Sorocaba, localizada na cidade de Sorocaba, estado de São Paulo, Brasil. É relevante destacar que a utilização do breu neste trabalho baseia-se em suas propriedades naturais que contribuem para a coesão de materiais compósitos, especialmente em combinação com outros aditivos (SPIER, 2024). Essas características fazem do breu uma alternativa sustentável e eficiente para substituir insumos convencionais em aplicações industriais, alinhando-se às iniciativas de redução de impactos ambientais e promoção de materiais renováveis.

Figura 17 – Breu Colofônia

Fonte: autora (2024)

5 METODOLOGIA

5.1 Estudo exploratório

Inicialmente, foram conduzidos ensaios físicos, mecânicos e de microscopia com o objetivo de avaliar as propriedades dos painéis pós-consumo antes de sua transformação em partículas. Os resultados obtidos desses painéis, provenientes de móveis descartados, foram comparados com os parâmetros estabelecidos pela norma brasileira para painéis de madeira reconstituída (ABNT NBR 14810-2:2018). Em seguida, tais resultados foram confrontados com os valores obtidos nos ensaios realizados nos novos painéis produzidos com as partículas pós-consumo.

Posteriormente, realizou-se um estudo preliminar para investigar as propriedades potenciais de painéis fabricados exclusivamente com partículas de painéis pós-consumo aglutinadas com 10% de adesivo PUR. Para isso, foram produzidos três painéis, submetidos a um processo de prensagem a 5 MPa, com temperatura de 160 °C e duração de 10 minutos. Os resultados demonstraram valores promissores, especialmente para os painéis obtidos a partir de resíduos de móveis do tipo MDP, sugerindo a viabilidade técnica do material para aplicações futuras. A Figura 18 apresenta o aspecto visual dos painéis produzidos, destacando sua homogeneidade e conformidade com os parâmetros esperados.

Figura 18 - Painel produzido com 100% de partículas pós-consumo e 10% de PUR

Fonte: autora (2024)

5.2 Definição dos tratamentos

Com base nos resultados obtidos no estudo exploratório, foram definidas sete composições distintas para a produção dos painéis. A primeira mistura foi composta exclusivamente por 100% de partículas pós-consumo, aglutinadas com 10% de adesivo PUR em relação à massa seca das partículas. Subsequentemente, foram elaboradas duas misturas com substituição parcial das partículas por PET, nas proporções de 85% de partículas pós-consumo e 15% de aditivo de PET e 70% pós-consumo e 30% de PET, respectivamente. Outras duas composições foram realizadas substituindo as partículas por breu, mantendo as proporções de 85% de partículas e 15% de aditivo de breu e 70% pós-consumo e 30% de breu. Por fim, foram desenvolvidas duas misturas adicionais, combinando partículas pós-consumo, breu e PET, nas proporções de 70% de partículas pós-consumo, 15% de PET e 15% de breu e 40% de pós-consumo, 30% de PET e 30% de breu, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 4.

Os resultados obtidos para cada composição foram avaliados em conformidade com os parâmetros normativos estabelecidos, além de serem comparados com dados

disponíveis na literatura correlata. Essa abordagem permitiu uma análise crítica das propriedades físicas e mecânicas dos painéis, bem como a identificação de tendências e possibilidades de aplicação dos materiais desenvolvidos.

Tabela 4 - Misturas propostas para confecção dos painéis

Mistura	MDP (%)	PUR (%)	PET (%)	Breu (%)
100MDP	100	10	-	-
85MDP15PET	85	10	15	-
70MDP30PET	70	10	30	-
85MDP15BREU	85	10	-	15
70MDP30BREU	70	10	-	30
70MDP15PET15BREU	70	10	15	15
40MDP30PET30BREU	40	10	30	30

Fonte: autora (2024)

Foi considerada uma densidade nominal de 0,55 g/cm³, valor próximo ao utilizado em estudos correlatos realizados por Santos Junior (2024), Herradon (2023), Cazella (2022) e Gilio (2020). Embora essa densidade possa ser considerada baixa para os padrões almejados, a escolha foi fundamentada na necessidade de ajuste da densidade final devido à alta densidade do adesivo e do PET empregados.

No que diz respeito ao procedimento metodológico, o adesivo à base de óleo de mamona foi utilizado na proporção de 1 parte de óleo de mamona para 1 parte de endurecedor, conforme as orientações do fabricante. Quanto aos parâmetros de prensagem, todos os painéis foram prensados a uma temperatura de 160 °C, pressão de 5 MPa e tempo de 10 minutos. Esses parâmetros foram adaptados com base nos estudos de Santos Junior (2024), Herradon (2023), Cazella (2022) e Gilio (2020), com o objetivo de otimizar as propriedades dos painéis, particularmente para favorecer o derretimento do PET e sua integração às partículas pós-consumo.

Como resultado, foram produzidos três painéis para cada uma das sete proporções de misturas estabelecidas, totalizando 21 painéis. Além disso, outros três painéis compostos exclusivamente por partículas pós-consumo foram testados, perfazendo um total de 24 painéis avaliados. A Figura 19 ilustra as composições das misturas: (a) somente com partículas pós-consumo; (b) MDP com PET; (c) MDP com breu; e (d) MDP com PET e breu, respectivamente.

Figura 19 – Misturas para produção dos painéis

(a) (b)

(c) (d)

Fonte: autora (2024)

5.3 Produção das partículas

Os painéis pós-consumo utilizados nesta pesquisa foram exclusivamente do tipo MDP. Antes de serem processados, esses painéis foram submetidos a um corte

inicial e à remoção parcial da película superior, etapa necessária para o preparo das amostras. Em seguida, os materiais foram acondicionados em tambores e mantidos submersos em água por um período de 15 dias, conforme ilustrado na Figura 20. A cada intervalo de 5 dias, toda a água era substituída, com o objetivo de evitar odores desagradáveis e possíveis contaminações por agentes externos, em conformidade com a metodologia adaptada de Silva (2006). A água residual foi descartada nas grelhas do laboratório para que contaminassem o esgoto convencional.

Durante o processo de imersão, partículas muito finas e resíduos em pó eram descartados juntamente com a água, favorecendo a purificação do material. À medida que o adesivo presente nos painéis de MDP se dissolvia na água, as partículas de madeira iam se desprendendo, facilitando sua separação e posterior utilização nas etapas subsequentes da pesquisa.

Figura 20 – Painéis pós-consumo condicionados no tambor com água

Fonte: autora (2024)

Apesar do processo de imersão e troca de água, algumas porções dos painéis de MDP não se desagregaram completamente. Para lidar com esse problema, foi

empregada uma metodologia de peneiramento forçado, adaptada de Bezerra (2006), utilizando uma peneira circular com malha de 8 mm (Figura 21a). Nesse procedimento, os grumos de partículas foram friccionados contra a malha da peneira até que se desmanchassem, permitindo a separação eficiente das partículas (Figura 21b).

Esse método mostrou-se eficaz para garantir a uniformidade do material particulado, eliminando aglomerados e facilitando sua posterior utilização nas etapas de produção dos painéis. Além disso, a utilização de peneiramento forçado contribui para padronizar o tamanho das partículas, um fator essencial para a qualidade e consistência dos painéis fabricados, conforme descrito na literatura correlata.

Figura 21 – (a) peneiramento forçado e (b) partículas de MDP passantes

(a) (b)

Fonte: autora (2024)

5.3.1 Composição granulométrica

Foi estabelecido que as partículas de MDP provenientes de painéis pós-consumo não seriam submetidas ao processamento em moinhos de facas, limitando-se ao processo de classificação granulométrica. Essa decisão visou avaliar a viabilidade técnica e a aplicabilidade da pesquisa em um possível modelo futuro de produção circular industrial. Durante o peneiramento forçado, as partículas de maior dimensão foram descartadas, enquanto as partículas muito finas foram eliminadas no

processo de troca de água, garantindo um material mais uniforme e adequado para as etapas subsequentes.

Para determinar a composição granulométrica, foi realizado um ensaio adaptado da norma ABNT NBR NM 248 (2003). Embora a norma estipule que a massa mínima da amostra deva ser de 300 g, foram feitas adaptações devido à menor densidade do material utilizado, em comparação com areia ou brita. Assim, foi adotada uma amostra de 70 g, com tempo de agitação de 15 minutos e vibração no nível 4, conforme as adaptações metodológicas de Bispo (2020) e Souza (2022).

A geometria das partículas desempenha um papel crucial nas propriedades finais dos painéis. Um tamanho mais uniforme das partículas favorece uma distribuição homogênea no colchão de partículas, otimizando o processo de fabricação e promovendo uma melhor impregnação do adesivo. Isso contribui diretamente para a qualidade e desempenho dos painéis produzidos.

As peneiras utilizadas no ensaio, Figura 22, foram selecionadas em ordem decrescente de abertura das malhas. As dimensões das malhas utilizadas foram: 1/4", nº 4, nº 8, nº 16, nº 30 e nº 50, com aberturas correspondentes de 6,30 mm; 4,76 mm; 2,38 mm; 1,19 mm; 0,595 mm; e 0,297 mm, respectivamente.

O ensaio de composição granulométrica das partículas foi realizado utilizando uma amostra representativa para cada mistura destinada à produção dos painéis. Durante o ensaio, foram calculadas as médias das massas retidas e acumuladas, além do módulo de finura, com o objetivo de determinar as dimensões das partículas e avaliar sua distribuição granulométrica.

É importante destacar que a análise foi realizada exclusivamente nas partículas presentes nas misturas, excluindo o breu. Devido ao processo de trituração, o breu se transformou em um material pulverizado, dificultando sua inclusão nos ensaios granulométricos. Esse enfoque permitiu uma avaliação mais precisa das partículas de MDP e PET, que desempenham papel fundamental na composição e nas propriedades finais dos painéis.

Figura 22 - Determinação da composição granulométrica

Fonte: autora (2024)

5.3.2 Umidade das partículas

Conforme Nascimento, Lahr e Christoforo (2015) e Iwakiri (2005), o teor de umidade ideal das partículas deve estar entre 3% e 5% para otimizar a interação com o adesivo e as propriedades dos painéis. Para atingir esse parâmetro, as partículas pós-consumo (MDP) foram inicialmente expostas ao sol por 48 horas em Lins, São Paulo, e, posteriormente, transportadas ao laboratório da Unesp em Ilha Solteira, onde apresentaram um teor de umidade de 8%. Para adequação, foram secas em estufa a 100 °C por 24 horas, reduzindo a umidade para cerca de 3%.

As partículas de PET foram expostas ao sol por 6 horas em Ilha Solteira para eliminar eventuais traços de umidade acumulada durante o armazenamento. Esse controle garantiu que os materiais estivessem dentro dos padrões adequados para assegurar a qualidade dos painéis, com uma distribuição homogênea do adesivo e melhor adesão entre as partículas.

Figura 23 – Secagem ao ar livre (a) partículas pós-consumo e (b) partículas de PET

(a) (b)

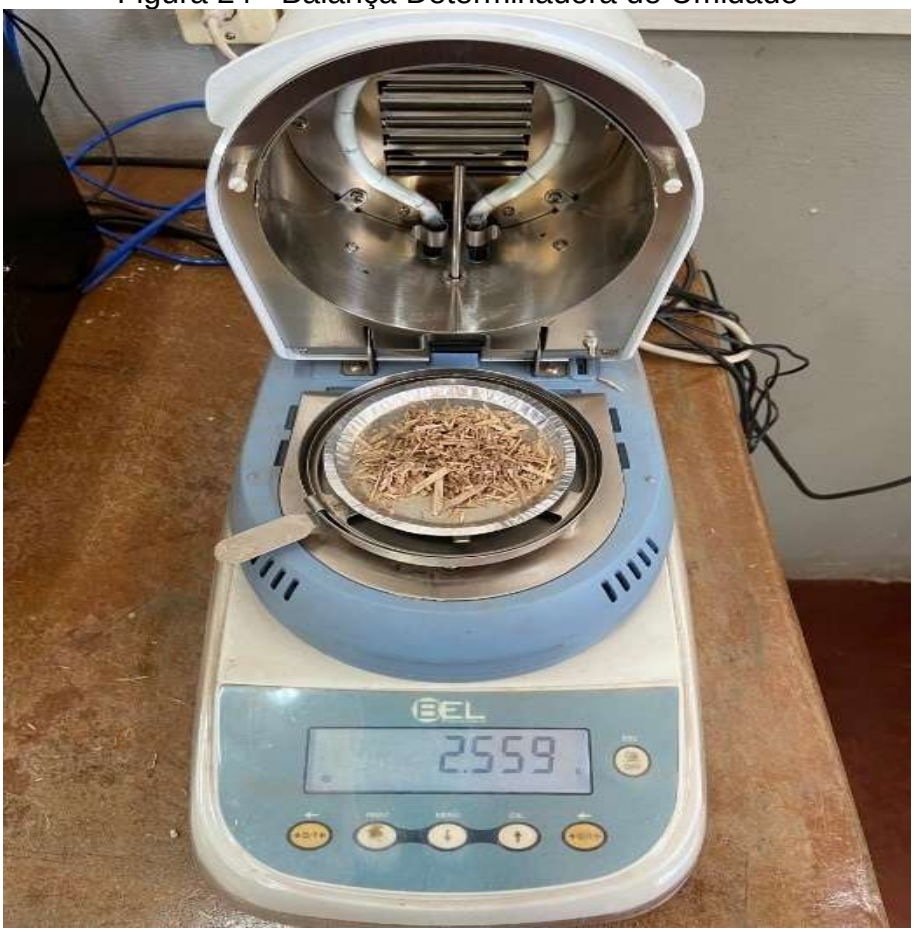
Fonte: autora (2024)

Para a verificação do teor de umidade das partículas, foi realizado um ensaio utilizando uma Balança Determinadora de Umidade da marca Bel, com precisão de 0,0001 g, operando a uma temperatura controlada de 100 °C durante um tempo de 2 minutos, conforme ilustrado na Figura 24.

De acordo com a norma ABNT NBR 9939 (2012), o teor de umidade das partículas deve ser determinado utilizando-se uma estufa. Contudo, neste estudo, foi adotada a balança térmica como alternativa à estufa, devido à sua eficiência e praticidade para a obtenção de resultados precisos. Esse procedimento substitutivo seguiu o padrão metodológico ilustrado na Figura 23, enquanto para as demais etapas do ensaio foi considerado o procedimento descrito no documento normativo.

Essa abordagem garantiu resultados confiáveis e alinhados às exigências normativas, além de possibilitar a adequação do método às condições específicas do experimento, preservando a precisão necessária para a análise do teor de umidade das partículas.

Figura 24 - Balança Determinadora de Umidade



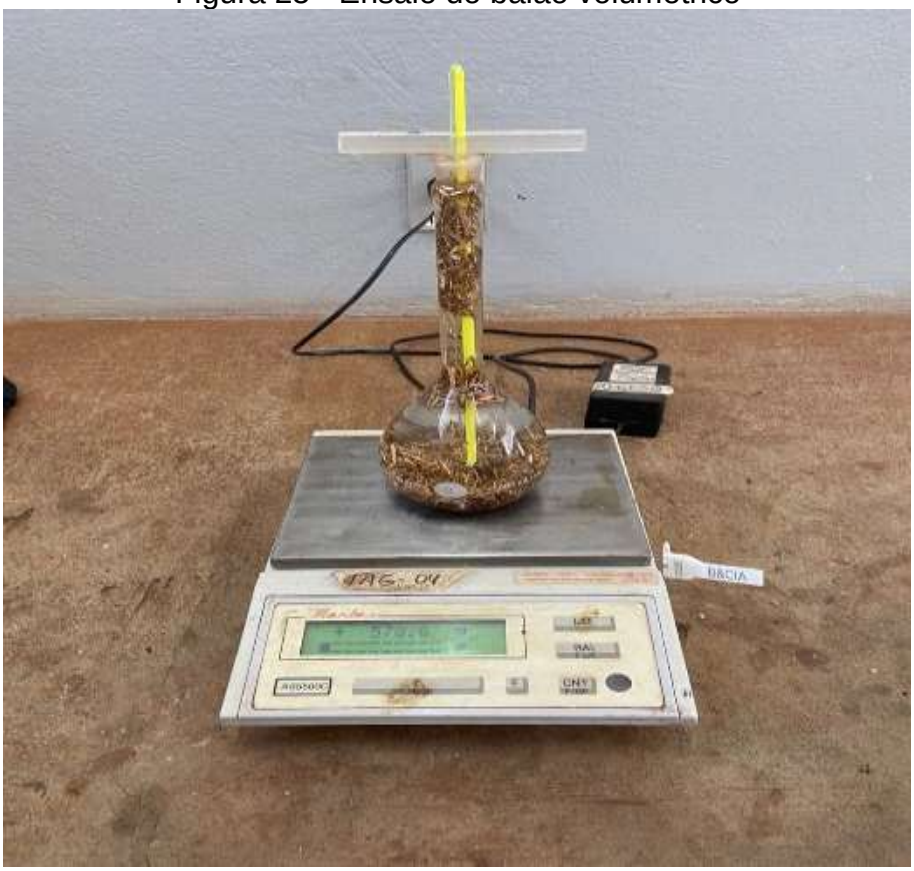
Fonte: autora (2024)

5.3.3 Massa específica das partículas

O cálculo da massa específica das partículas pós-consumo foi baseado nas normas ABNT NBR 6458 (2016) e ABNT NBR 6457 (2024), utilizando o método do balão volumétrico. Para o ensaio, utilizou-se um balão volumétrico nº2 com 500 mL de álcool etílico anidro a 99,3 °C INPM, termômetro de mercúrio (0,1 °C, -10 °C a 100 °C) e balança de precisão, com calibração prévia do balão, conforme Figura 25.

Awaja e Pavel (2005) e Ebewele (2000) apontam que o PET, devido à sua baixa taxa de absorção de água (0,1%-0,2%), é considerado impermeável e incompatível com o método citado, que é destinado a materiais permeáveis. Assim, os valores relacionados ao PET utilizados nesta pesquisa, apresentados na Tabela 3, são provenientes do controle de qualidade e das análises físicas e mecânicas da indústria, garantindo a precisão dos dados e a adequação metodológica ao material.

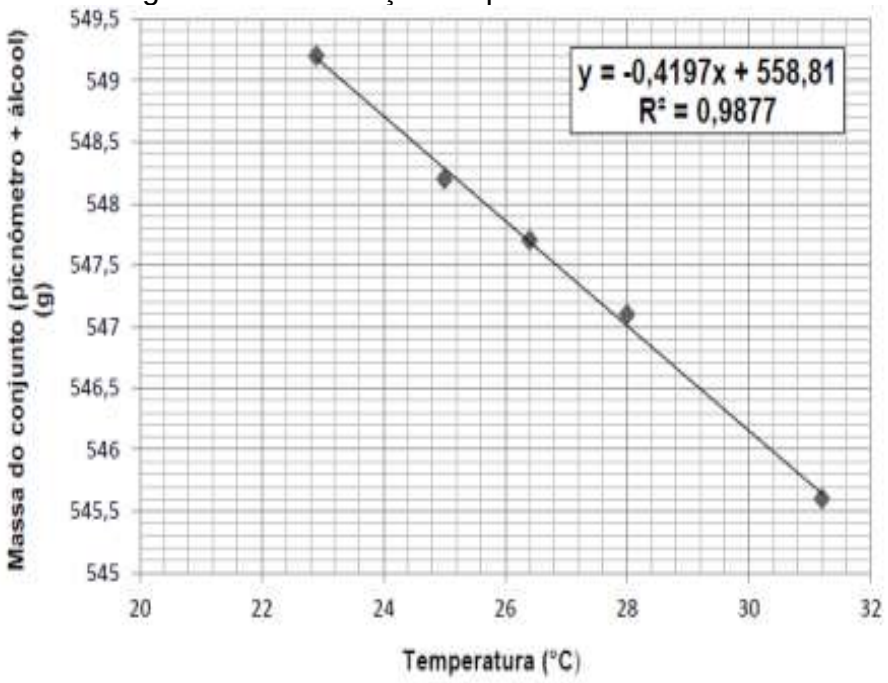
Figura 25 - Ensaio do balão volumétrico



Fonte: autora (2024)

Para permitir o uso do álcool absoluto, foi necessário calibrar o fluido usando o gráfico de dispersão criado por Bispo (2020) para a realização do ensaio – Figura 26.

Figura 26 - Calibração do picnômetro ao fluido



Fonte: Adaptado de Bispo (2020)

Após a calibração do picnômetro, a partir da Equação 1, foi determinado a massa específica das partículas pós-consumo (MDP):

$$ps = \frac{Ms\ x\ pw}{M1 - M2 + Ms} \quad (1)$$

Onde:

ρs = massa específica das partículas (g/cm³);

Ms = massa das partículas secas em estufa (g);

ρw = massa específica do álcool absoluto (g/cm³);

M2 = massa do picnômetro + álcool absoluto (g);

M1 = massa do picnômetro + álcool absoluto + partículas submersas (g).

Utilizando um funil de vidro como instrumento auxiliar, a massa M1 foi definida como a soma do material disperso contido no picnômetro e do álcool etílico adicionado ao recipiente. Com base no gráfico de calibração do picnômetro, a massa M2 obtida através dos valores coletados de M1, levando em consideração a estabilização da temperatura durante a condução do procedimento.

5.3.4 Razão de compactação

A razão de compactação é definida como a relação entre a densidade do painel e a densidade das partículas utilizadas em sua composição. Valores situados entre 1,3 e 1,6 indicam que o painel alcançará uma densificação e consolidação adequadas, assegurando a conformação das partículas (Araújo *et al*., 2019; Trianoski, 2010). O cálculo da razão de compactação é realizado conforme apresentado na Equação 2.

$$Rc = \frac{Dm}{\rho s} \quad (2)$$

Onde:

Rc = razão de compactação;

Dm = densidade média dos painéis das misturas (g/cm³);

ρsm = massa específica da mistura de partículas (g/cm³).

5.3.5 Cálculo da massa de partículas dos painéis

Para determinar a massa total das misturas, foi necessário estabelecer previamente uma densidade nominal para os painéis. O valor adotado foi de 0,55 g/cm³, fundamentado em estudos realizados por Herradon (2023), Souza (2022), Cazella (2022) e Rodrigues (2021), cujos resultados indicaram densidades médias aparentes dos painéis superiores a 0,55 g/cm³, influenciadas pela densidade do PET.

Com base nesse valor, foram calculadas as massas necessárias de partículas pós-consumo, PET, breu e adesivo para a produção dos painéis, de modo que a densidade final dos mesmos estivesse em conformidade com a ABNT NBR 14810-2 (2018). O cálculo foi realizado utilizando a Equação 3.

$$D = \frac{M}{V} \quad (3)$$

Onde:

D = densidade nominal dos painéis (g/cm^{-3});

M = massa de partículas necessária para confecção dos painéis (g);

V = volume painéis (cm³).

O volume total das partículas foi determinado com base nas dimensões do molde utilizado para o colchão de partículas, que mede 35 x 35 x 2 cm, totalizando um volume de 2450 cm³. Esse molde foi projetado para se encaixar perfeitamente na

prensa hidráulica utilizada durante o processo de produção. Com esse volume, a massa total empregada na produção dos painéis foi de 1348 g.

Após a definição da massa total, as partículas, os aditivos e o adesivo foram pesados de acordo com os valores apresentados na Tabela 5, garantindo a precisão necessária para a fabricação dos painéis.

Tabela 5 – Massa das misturas propostas para os painéis

Mistura	MDP (g)	PUR (g)	PET (g)	Breu (g)
100MDP	1348	135	-	-
85MDP15PET	1146	135	203	-
70MDP30PET	944	135	405	-
85MDP15BREU	1146	135	-	203
70MDP30BREU	944	135	-	405
70MDP15PET15BREU	944	135	203	203
40MDP30PET30BREU	540	135	405	405

Fonte: autora (2024)

5.4 Produção dos painéis

A metodologia para a homogeneização do adesivo PUR às partículas foi baseada nos estudos de Herradon (2023), Souza (2022), Cazella (2022), Bispo (2021) e Gilio (2020). O processo iniciou-se com a adição do poliol às partículas, seguido de uma mistura manual preliminar de 3 minutos (Figura 27b). Em seguida, a mistura foi transferida para um tambor rotativo, onde permaneceu em homogeneização por mais 5 minutos. O mesmo procedimento foi repetido para o pré-polímero: adição às partículas, homogeneização manual por 3 minutos, seguida de uma homogeneização final em tambor rotativo por 5 minutos.

Esse método de homogeneização melhora significativamente o encapsulamento das partículas pelo adesivo, reduzindo a probabilidade de formação de concentrações de adesivo, grumos ou bolhas no interior do painel, além de uniformizar a cura do adesivo. Tais benefícios são fundamentais para garantir a qualidade e o desempenho dos painéis, como apontado por Campos e Lahr (2004) e Sugahara (2018).

Figura 27 - (a) homogeneização manual (b) homogeneização em tambor giratório

(a) (b)

Fonte: autora (2024)

Após a homogeneização da mistura, inicia-se a preparação do colchão de partículas. O material é depositado no molde específico, com dimensões de 35 cm x 35 cm, e submetido a uma prensagem a frio com o auxílio da tampa do molde, garantindo a compactação inicial.

Conforme ilustrado na Figura 28 (a, b e c), o colchão é então colocado entre os pratos da prensa hidráulica, onde o molde é retirado. Os painéis são prensados sob pressão de 5 MPa e temperatura de 160 °C por um total de 10 minutos.

O procedimento de prensagem ocorre em duas etapas: inicialmente, os painéis são prensados por 5 minutos, seguidos por um alívio de pressão de 30 segundos para permitir a liberação de gases e evitar a formação de bolhas no interior dos painéis. Em seguida, realiza-se uma segunda etapa de prensagem por mais 5 minutos.

Esse procedimento, com ajustes específicos na temperatura, foi adaptado e segue as metodologias empregadas por Santos Junior (2024), Herradon (2023), Cazella (2022), Souza (2022) e Gilio (2020), garantindo a qualidade estrutural dos painéis e otimizando suas propriedades físicas e mecânicas.

Figura 28 - (a) painel na prensa, (b) painel pronto para prensagem, (c) painel prensado

(a) (b) (c)

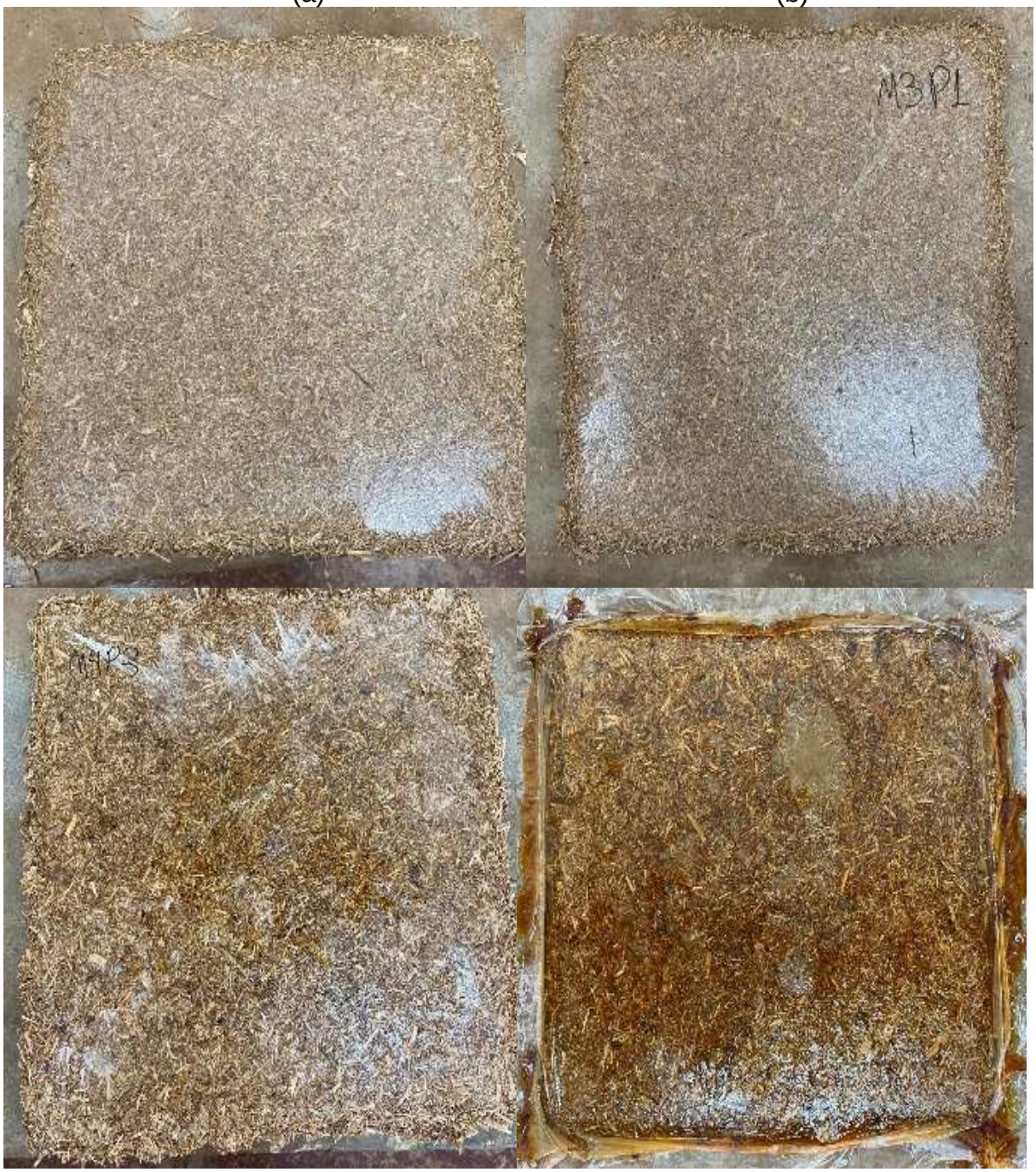
Fonte: autora (2024)

Após o processo de prensagem, os painéis foram acondicionados em local coberto, sob temperatura ambiente, durante um período de 7 dias para a cura completa do adesivo, em conformidade com as recomendações do fabricante. Esse intervalo foi fundamental para assegurar a consolidação estrutural e a estabilidade das propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

A Figura 29 apresenta as quatro propostas produzidas: (a) compostos por 100% de partículas pós-consumo (MDP); (b) com a proporção de 70% de partículas pós-consumo e 30% de PET; (c) com 85% de pós-consumo e 15% de breu; e (d) com 40% de partículas pós-consumo, 30% de PET e 30% de breu, respectivamente.

Figura 29 – (a) 100% MDP, (b) 70/30 MDP/PET, (c) 85/15 MDP/Breu, (d) 40/30/30 MDP/PET/Breu

(a) (b)



(c) (d)

Fonte: autora (2024)

5.5 Preparação dos corpos de provas

Os painéis provenientes de móveis descartados foram submetidos aos mesmos ensaios aplicados aos novos painéis produzidos com partículas pós-consumo,

garantindo a consistência metodológica entre as análises. Em ambos os casos, a mesma abordagem experimental foi utilizada. Após a cura completa do adesivo nos painéis desenvolvidos e, previamente, nos painéis de MDP descartados, foi realizado o esquadrejamento dos painéis para a obtenção dos corpos de prova (cps), conforme as dimensões e finalidades descritas:

- Corpos de prova com dimensões de 350 mm x 50 mm: ensaio de Resistência à Flexão Estática;
- Cps com dimensões de 50 mm x 50 mm: ensaios de Tração Perpendicular (TP), Densidade (D), Inchamento (I), Absorção (A) e Umidade (U).

5.6 ENSAIOS FÍSICOS

Para os ensaios físicos de Densidade (D), Inchamento 24h (I), Absorção 24h (A) e Teor de Umidade (TU) foi utilizada a norma ABNT NBR 14810-2 (2018).

5.6.1 Densidade (D)

Conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 14810-2 (2018), foram utilizados 10 corpos de prova provenientes dos painéis de MDP e 10 cps para cada uma das misturas desenvolvidas. As dimensões de cada cp foram aferidas utilizando: micrômetro com precisão de 0,001 mm, paquímetro com precisão de 0,1 mm e balança com precisão de 0,1 g, conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - aferição da espessura e das arestas dos corpos de prova

Fonte: autora (2024)

Com os valores obtidos, foram calculados os volumes por meio da Equação 4:

$$V = b1\ x\ b2\ x\ e \tag{4}$$

Onde:

V = volume do cp (mm³);

$b1$ e $b2$ = dimensões das arestas do cp (mm);

e = espessura do cp (mm).

A densidade dos corpos de provas foi obtida através da Equação 5:

$$D = \frac{M}{V} x\ 1.000 \tag{5}$$

Onde:

D = densidade do cp (g/cm³);

M = massa do cp (g);

V = volume do cp (mm³).

Para o cálculo da densidade foi utilizado a Equação 6:

$$D\% = \frac{D - Dmédia}{Dmédia} x\ 100 \tag{6}$$

Onde:

$D\%$ = variação percentual da densidade (%);

D = densidade do cp (g/cm³);

$Dmédia$ = densidade média dos cps (g/cm³)

5.6.2 Teor de umidade (U)

O ensaio para determinação do teor de umidade desempenha um papel essencial na avaliação das propriedades finais dos painéis, uma vez que teores elevados de umidade estão associados à redução das propriedades físicas e mecânicas (Nascimento *et al*., 2015).

Para a realização do ensaio, foram utilizados 10 corpos de prova dos painéis de MDP e 10 corpos de prova de cada mistura, todos com dimensões aproximadas de 50 mm x 50 mm (Figura 31a). A massa inicial dos cps foi medida utilizando uma balança de precisão de 0,01 g. Em seguida, os cps foram submetidos a secagem em estufa (Figura 31b), mantidos a 103 °C ± 2 °C (Figura 31c).

Figura 31 - (a) cps úmidos, (b) estufa, (c) cps secos

(a) (b) (c)

Fonte: autora (2024)

O teor de umidade foi calculado de acordo com a Equação 7:

$$U = \frac{Mu - Ms}{Ms} \; x \; 100 \qquad (7)$$

Onde:

U = teor de umidade do cp (%);

Mu = massa úmida do cp (g);

Ms = massa seca do cp (g).

5.6.3 Inchamento em espessura 24h (I) e Absorção após 24h (A)

Os valores de inchamento em espessura e absorção de água após 24 horas são essenciais para avaliar a adequação dos painéis aos ambientes internos ou externos (Iwakiri, 2005).

Para determinar o inchamento foram utilizados 10 corpos de prova de painéis de MDP e 10 de cada mistura (Figura 32a). Os cps foram submersos em água deionizada em um recipiente de PVC, com telas metálicas e pesos para garantir sua total imersão sob uma lâmina de 25 mm de água (Figura 32b). Após 24 horas, foi medida novamente a espessura dos corpos de prova (Figura 32c).

Figura 32 – (a) cps antes, (b) durante o ensaio, (c) depois do ensaio

(a) (b) (c)

Fonte: autora (2024)

Com os valores obtidos das espessuras iniciais, finais e o peso de cada cp, foi possível através da Equação 8, obter os valores de Inchamento em espessura 24h e através da Equação 9, obter os valores de Absorção após 24h.

$$I = \frac{Ef - Ei}{Ei} \; x \; 100 \tag{8}$$

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).

$$A = \frac{Mu - Ms}{Ms} \; x \; 100 \tag{9}$$

Onde:

A = absorção de água após 24h do cp (%);

Mu = massa úmida do cp (g);

Ms = massa seca do cp (g).

5.7 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos foram conduzidos no Núcleo de Ensino e Pesquisa em Alvenaria Estrutural (NEPAE), localizado no campus central da FEIS – UNESP. Para a determinação do módulo de resistência à flexão estática (MOR), do módulo de elasticidade (MOE) e da resistência à tração perpendicular (TP), utilizou-se a máquina universal de ensaios EMIC GR048, com capacidade máxima de 300 kN. Todos os ensaios foram realizados em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 14810-2 (2018).

5.7.1 Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE)

O ensaio de flexão estática consiste no rompimento do corpo de prova (cp) submetido à flexão, conforme ilustrado na Figura 32. Foram utilizados 10 corpos de prova com dimensões de 350 mm x 50 mm x e mm, extraídos dos painéis pós-consumo (Figura 33a) e das misturas (Figuras 33b e 33c). A espessura (e) dos corpos de prova variou entre 20 mm e 10 mm. Durante o ensaio, os corpos de prova foram posicionados em um sistema bi apoiado, com a distância entre apoios calculada de acordo com a Equação 10.

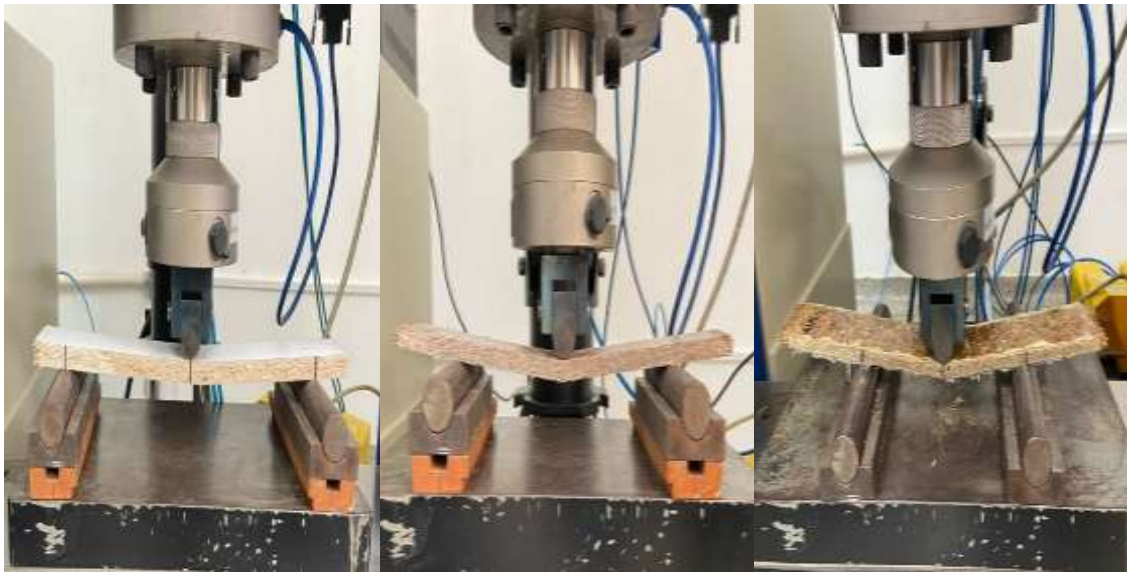
$$D = 20\ x\ e \tag{10}$$

Onde:

D = distância entre apoios do aparelho (mm);

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

Figura 33 – Ensaio nos: (a) painel pós-consumo (MDP), (b) mistura com PET, (c) mistura com breu



(a) (b) (c)

Fonte: autora (2024)

Com base nos valores obtidos no indicador de cargas da máquina, o Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR) e o Módulo de Elasticidade (MOE) são calculados através da Equação 11 e 12 respectivamente.

$$MOR = \frac{1{,}5\ x\ (P\ x\ D)}{B\ x\ (E)^2} \quad (11)$$

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).

$$MOE = \frac{(P1\ x\ D^3)}{d\ x\ 4\ x\ P\ x\ E^3} \quad (12)$$

Onde:

MOE = módulo de elasticidade (MPa);

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

D = distância entre apoios do aparelho (mm);

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

B = largura do cp (mm);

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

5.7.2 Resistência à Tração Perpendicular (TP)

Para a determinação da Resistência à Tração Perpendicular, foram utilizados corpos de prova com dimensões de 50 mm x 50 mm, cuja espessura variou conforme sua origem (painéis de MDP) e o tipo de tratamento aplicado (misturas propostas).

Inicialmente, foi realizado um lixamento manual para uniformizar as faces dos corpos de prova, uma vez que a lixadeira automatizada estava em manutenção. Para essa etapa, utilizou-se uma morsa (Figura 34a) para fixar os corpos de prova garantindo que os cps não sofressem danos durante o processo (Figura 34b).

Figura 34 – (a) morsa e (b) lixamento manual

(a) (b)

Fonte: autora (2024)

Após o lixamento, os corpos de prova foram limpos com ar comprimido para remover resíduos de pó e assegurar superfícies completamente limpas. Essa etapa foi essencial para evitar interferências na adesão entre os corpos de prova, a cola e o suporte metálico, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos no ensaio.

Os suportes metálicos utilizados no ensaio eram novos, motivo pelo qual não necessitaram de limpeza com esmerilhadeira. Entretanto, para remover uma fina camada superficial escurecida, foi utilizado lixamento com lixa de ferro, após fixá-los em uma morsa.

Para melhorar a aderência entre os suportes metálicos, a cola e os corpos de prova, a superfície dos suportes que entra em contato com esses materiais foi deixada rugosa com o auxílio de uma lima. Por fim, as superfícies dos suportes metálicos foram limpas com thinner, garantindo uma higienização completa e adequada para o ensaio (Figura 35).

Figura 35 - Preparação do suporte metálico

(a) (b) (c)

Fonte: autora (2024)

A colagem dos cps aos suportes foi feita com o adesivo epóxi Araldite Profissional 90 minutos (Figura 36), com secagem inicial de 90 min e total de 24h.

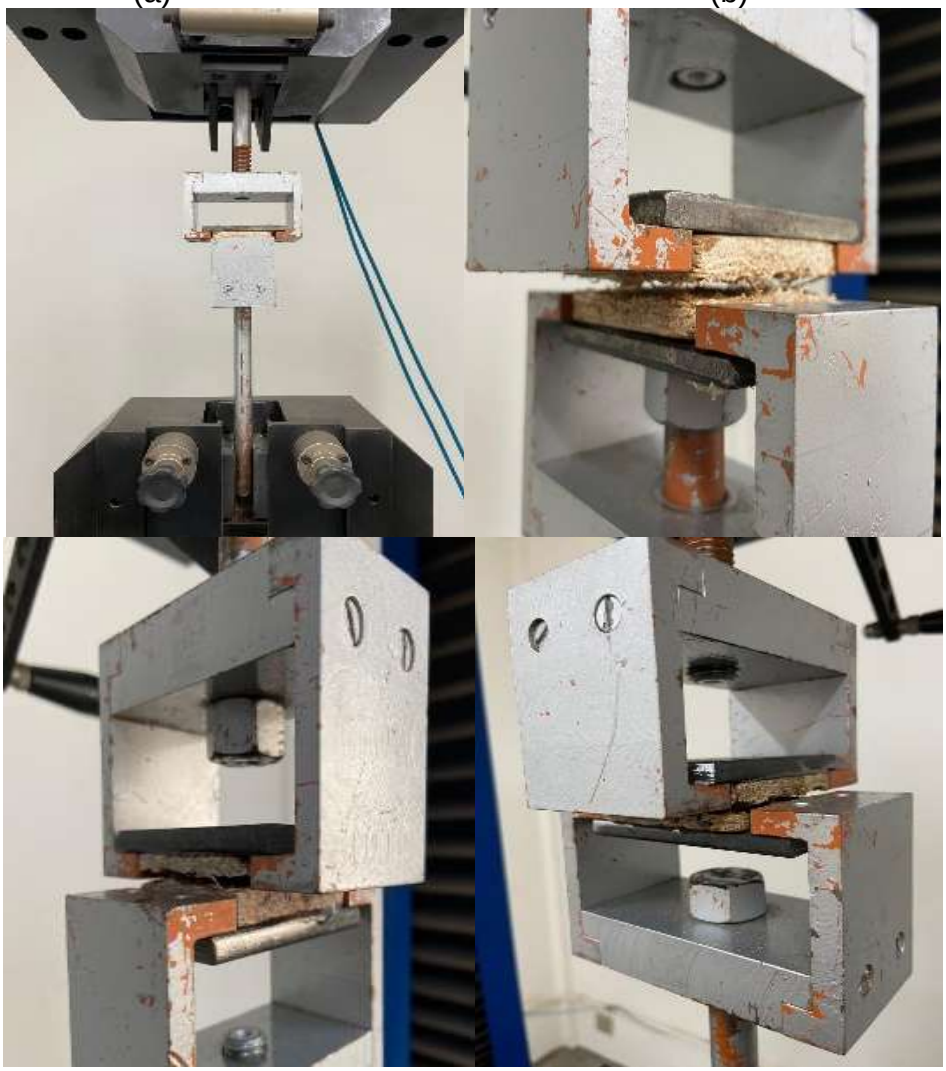
Figura 36 - Cola utilizada para colar o cp ao suporte metálico

Fonte: autora (2024)

Após as 24h, os corpos de provas foram submetidos ao ensaio de Resistência à Tração Perpendicular, utilizando a máquina universal de ensaios (Figura 37).

Figura 37 - (a) máquina universal de ensaios EMIC, (b) cp rompido de MDP, (c) cp rompido - mistura com PET, (d) cp rompido - mistura com breu

(a) (b)



(c) (d)

Fonte: autora (2024)

A partir dos resultados lidos pela máquina, calculou-se os valores de TP utilizando as Equações 13 e 14.

$$TP = \frac{P}{S} \tag{13}$$

$$S = b1\ x\ b2 \tag{14}$$

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).

5.8 MICROSCOPIA ELETÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) realizada nos painéis pós-consumo teve como objetivo aprofundar a compreensão da relação entre as partículas e o adesivo, além de comparar as imagens obtidas com aquelas dos painéis produzidos durante a pesquisa. Essa comparação visou identificar as principais diferenças entre a interação adesivo-partícula em processos industriais e a interação nos painéis desenvolvidos em laboratório.

Nos painéis produzidos com partículas pós-consumo, o ensaio de MEV focou na análise de interações específicas: entre o adesivo PUR e as partículas pós-consumo; entre o PET e as partículas; e entre o breu e as partículas, especialmente no que diz respeito ao "envelopamento" proporcionado pelo breu. A análise buscou compreender o comportamento do adesivo e dos aditivos sob as condições de temperatura e pressão aplicadas durante o processo de prensagem, além de avaliar o comportamento combinado das partículas, aditivos e adesivo.

Para a realização do ensaio, as análises foram conduzidas na região de ruptura dos cps, utilizando amostras com dimensões de 1 x 1 x 0,4 cm. As amostras foram fixadas com fita adesiva dupla face de carbono em um suporte tipo "porta Stub" e revestidas com uma fina camada de ouro, empregando o equipamento Quorum, modelo Q150TE. Posteriormente, foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura ZEISS, modelo EVO LS15, equipado com um sistema de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da OXFORD Instruments, modelo INCAx-act.

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

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos ao longo da pesquisa e sua discussão à luz da literatura científica e dos parâmetros normativos estabelecidos. O objetivo é analisar criticamente os dados experimentais, destacando as propriedades físicas e mecânicas dos painéis aglomerados homogêneos produzidos com partículas de painéis pós-consumo e adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona, aditivados com polietileno tereftalato (PET) e breu.

A análise considera os parâmetros normativos da ABNT NBR 14810-2 (2018) e os compara com estudos correlatos. Além disso, busca-se compreender como os diferentes tratamentos influenciaram nas características dos painéis, abordando tanto os avanços quanto os desafios encontrados no desenvolvimento de materiais sustentáveis. Esta abordagem permite uma visão abrangente do potencial de aplicação dos painéis no setor moveleiro e em outras áreas da construção civil.

Por fim, os resultados são discutidos em termos de sua contribuição para a substituição de insumos, a redução de resíduos e a promoção de práticas alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente nas áreas de produção responsável e combate às mudanças climáticas.

6.1 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS

6.1.1 Teor de umidade das partículas

Os dados referentes aos teores de umidade médio das partículas para os tratamentos estudados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Teor de umidade das partículas pós-consumo e de PET

Partícula	Teor de umidade médio (%)
MDP	3,14
PET	0,12

Fonte: autora (2024)

Kolmann (1975) considera o intervalo de 3% a 12% como adequado para o teor de umidade das partículas utilizadas na produção de painéis derivados de madeira. As partículas de MDP pós-consumo analisadas neste estudo enquadraram-se nesse intervalo, enquanto as partículas de PET, devido ao seu baixo teor de umidade,

mostraram-se particularmente favoráveis para a combinação com o adesivo PUR. Adicionalmente, Dotun, Adesoji e Oluwatimilehin (2018) reforçaram os benefícios de um teor de umidade variando entre 2% e 8% na produção de painéis, evidenciando seu impacto positivo nas propriedades finais do produto.

Estudos predecessores e contemporâneos demonstraram que baixos teores de umidade das partículas favorecem uma boa interação com o adesivo, resultando em um desempenho mecânico superior dos painéis. A manutenção de baixos teores de umidade é especialmente recomendada por proporcionar os seguintes benefícios:

- Prevenir o excesso de vapor durante o processo de prensagem;
- Evitar a formação de bolhas no interior dos painéis, que poderiam causar rupturas prematuras (Herradon, 2023).

Essa precaução é fundamental para garantir o máximo desempenho dos painéis, especialmente no que diz respeito à resistência mecânica e à durabilidade estrutural.

6.1.2 Massa específica das partículas

O valor obtido da massa especifica das partículas pós-consumo está apresentada na Tabela 7, assim como das misturas com partículas de Pinus e PET. A massa específica das partículas de PET foi obtida através da literatura.

Tabela 7 - Massa específica das partículas e das misturas

Partícula	**Massa específica da partícula (g/cm³)**
MDP (pós-consumo)	0,596
PET	1,36
85MDP15PET	0,62
70MDP30PET	0,76
85MDP15BREU	0,596
70MDP30BREU	0,596
70MDP15PET15BREU	0,67
40MDP30PET30BREU	0,77

Fonte: autora (2024)

As misturas que passaram pelo ensaio de massa específica não tiveram a adição do breu, por se tratar de um pó.

O valor encontrado para as partículas pós-consumo quando comparado aos da ABNT NBR 7190 (1997), enquadra as partículas como sendo de média densidade, próximas dos valores encontrados para o Pinho do Paraná (*Araucária angustifólia)*.

Nota-se que as partículas de MDP apresentaram massa específica significativamente menor que as partículas de PET. Isso exerceu influência no aumento da massa específica das misturas, devido às substituições de partículas pós-consumo pelo polímero.

6.1.3 Razão de compactação

Os valores do índice de compactação encontrados nas misturas ficaram muito próximos ou se enquadram totalmente nos limites estabelecidos por Araujo *et al* (2019) e Trianoski (2010), que estipulam valores entre 1,3 e 1,6. Sendo assim, pode-se dizer que os painéis tiveram uma boa compactação e densificação

A Tabela 8 apresenta os valores obtidos para o índice de compactação, que é a razão entre a densidade média dos painéis e a massa específica das partículas.

Tabela 8 - Índice de compactação das misturas

Mistura	D (g/cm³)	ρs (g/cm³)	Índice de compactação
100MDP	0,52	0,596	1,37
85MDP15PET	0,81	0,62	1,51
70MDP30PET	0,90	0,76	1,67
85MDP15BREU	1,00	0,596	1,52
70MDP30BREU	0,91	0,596	1,69
70MDP15PET15BREU	1,01	0,67	1,65
40MDP30PET30BREU	1,11	0,77	1,49

Fonte: autora (2024)

6.1.4 Determinação granulométrica

A granulometria das partículas influencia diretamente as propriedades finais dos painéis e impacta no processo de produção (Araújo *et al.*, 2019). Quando mal manejadas, partículas finas podem comprometer o módulo de resistência (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) dos painéis (Souza, 2022). Contudo, sua utilização adequada proporciona melhor acabamento superficial nos painéis (Iwakiri, 2005).

Nesse contexto, a granulometria das partículas foi determinada com base nos percentuais de material retido nas peneiras e na análise dos módulos de finura (MF).

Tabela 9 - Composição granulométrica 100% MDP

Peneira Nº	Abertura (mm)	Massa retida média (g)	Retido (%)	Massa retida acumulada (g)	Retido acumulado (%)
1/4"	6,30	2,48	3,54	2,48	3,54
4	4,76	1,79	2,55	4,27	6,10
8	2,38	13,75	19,65	18,02	25,74
16	1,19	20,72	29,60	38,74	55,34
30	0,60	17,69	25,28	56,43	80,61
50	0,30	0,00	0,00	56,43	80,61
Fundo	-	13,57	-	-	-
Perdas (g)	-	0,00	0,00	-	-
MF	-	-	-	-	1,68

Fonte: autora (2024)

Verificou-se que as partículas pós-consumo se concentraram em três peneiras, conforme apresentado na Tabela 9. A peneira nº 8 reteve 19,65% das partículas, sendo a terceira em material retido. A peneira nº 30 reteve 25,28% das partículas, ocupando a segunda posição. A peneira nº 16 reteve 29,60% das partículas, sendo a com maior percentual de material retido. Essas três peneiras, combinadas, representaram 80,61% do total retido, com um módulo de finura de 1,68, classificando as partículas pós-consumo como finas, adequadas para aplicações que demandam uniformidade e homogeneidade.

Tabela 10 - Composição granulométrica 100% PET

Peneira Nº	Abertura (mm)	Massa retida média (g)	Retido (%)	Massa retida acumulada (g)	Retido acumulado (%)
1/4"	6,30	0,00	0,00	0,00	0,00
4	4,76	0,13	0,18	0,13	0,18
8	2,38	4,20	6,00	4,33	6,19
16	1,19	43,83	62,61	48,16	68,80
30	0,60	17,34	24,77	65,49	93,56
50	0,30	0,00	0,00	65,49	93,56
Fundo	-	4,51	-	-	-
Perdas (g)	-	0,00	0,00	-	-
MF	-	-	-	-	1,69

Fonte: autora (2024)

Como Conforme apresentado na Tabela 10, a maior retenção de partículas de PET ocorreu na peneira nº 16 que reteve 62,61% das partículas, o maior acúmulo e a

peneira nº 30 que reteve 24,77% das partículas, ocupando a segunda posição. Combinadas, as duas peneiras representaram uma retenção total de 93,56% das partículas, com um módulo de finura calculado de 1,69. Classificando o PET como fino, característica que favorecem misturas que exigem uniformidade granulométrica.

Tabela 11 - Composição granulométrica 85% MDP e 15% PET

Peneira Nº	Abertura (mm)	Massa retida média (g)	Retido (%)	Massa retida acumulada (g)	Retido acumulado (%)
1/4"	6,30	2,11	3,01	2,11	3,01
4	4,76	1,55	2,21	3,66	5,23
8	2,38	12,13	17,33	15,79	22,56
16	1,19	26,95	38,50	42,57	61,06
30	0,60	15,11	21,59	57,85	82,64
50	0,30	0,00	0,00	57,85	82,64
Fundo	-	12,22	-	-	-
Perdas (g)	-	0,00	0,00	-	-
MF	-	-	-	-	1,71

Fonte: autora (2024)

Na Tabela 11 estão os resultados da mistura 85% de partículas pós-consumo e 15% de PET, as peneiras que mais acumularam partículas foram a peneira de número 16, com 62,61%, sendo a que mais acumulou e a peneira 30, que reteve 24,77% das partículas. As duas peneiras juntas retiveram 93,56% das partículas. Com MF de 1,69, classificando a mistura 85% MDP e 15% PET como fina.

Tabela 12 - Composição granulométrica 70% MDP 30% PET

Peneira Nº	Abertura (mm)	Massa retida média (g)	Retido (%)	Massa retida acumulada (g)	Retido acumulado (%)
1/4"	6,30	1,63	2,49	1,63	2,33
4	4,76	1,30	1,86	2,93	4,19
8	2,38	10,89	15,56	13,82	19,74
16	1,19	27,66	39,51	41,48	59,26
30	0,60	17,74	25,34	59,22	84,60
50	0,30	0,00	0,00	59,22	84,60
Fundo	-	10,86	-	-	-
Perdas (g)	-	0,00	0,00	-	-
MF	-	-	-	-	1,68

Fonte: autora (2024)

Na mistura composta por 70% de partículas pós-consumo e 30% de PET, as peneiras nº 16 e nº 30 apresentaram as maiores porcentagens de retenção, conforme

mostrado na Tabela 12. A peneira nº 16 reteve 41,48% das partículas. Já a peneira nº 30 reteve 25,34% das partículas. Juntas as peneiras representaram uma retenção de 84,60%, com um módulo de finura de 1,68. Esses resultados classificam a mistura como fina, adequadas para aplicações que demandam uniformidade.

Tabela 13 - Composição granulométrica 70% MDP, 15% PET e 15% BREU

Peneira Nº	Abertura (mm)	Massa retida média (g)	Retido (%)	Massa retida acumulada (g)	Retido acumulado (%)
1/4"	6,30	1,74	2,49	1,74	2,49
4	4,76	1,28	1,83	3,02	4,31
8	2,38	10,26	14,66	13,28	18,97
16	1,19	29,08	41,54	42,36	60,51
30	0,60	16,99	24,27	59,35	84,79
50	0,30	0,00	0,00	59,35	84,79
Fundo	-	10,18	-	-	-
Perdas (g)	-	0,00	0,00	-	-
MF	-	-	-	-	1,69

Fonte: autora (2024)

A Tabela 13 contém os dados da mistura com 70% de partículas pós-consumo e 15% de PET, novamente as peneiras que mais acumularam partículas foram a 16 e a 30, com 41,54%, maior acúmulo, e 24,27%, respectivamente. As duas peneiras tiveram uma porcentagem retira de 84,79%, com MF igual a 1,69, classificando a mistura como uma mistura de partículas finas também.

Tabela 14 - Composição granulométrica 40% MDP, 30% PET e 30% BREU

Peneira Nº	Abertura (mm)	Massa retida média (g)	Retido (%)	Massa retida acumulada (g)	Retido acumulado (%)
1/4"	6,30	1,21	1,73	1,21	1,73
4	4,76	1,76	2,51	2,97	4,24
8	2,38	9,82	14,03	12,79	18,27
16	1,19	32,99	47,13	45,78	65,40
30	0,60	17,47	24,96	63,25	90,36
50	0,30	0,00	0,00	63,25	90,36
Fundo	-	6,79	-	-	-
Perdas (g)	-	0,00	0,00	-	-
MF	-	-	-	-	1,78

Fonte: autora (2024)

Conforme apresentado na Tabela 14, a mistura composta por 40% de partículas pós-consumo (MDP) e 30% de PET apresentou uma retenção de 90,36%

das partículas nas peneiras nº 16 e nº 30. A peneira nº 16, com malha de 1,19 mm, reteve 45,78% das partículas, enquanto a peneira nº 30, com malha de 0,60 mm, foi a que acumulou a maior quantidade, com 63,25%.

Essa foi a única mistura em que a peneira nº 30 reteve mais partículas, o que pode ser atribuído à menor proporção de MDP na composição. O módulo de finura (MF) dessa mistura foi o maior registrado, atingindo 1,78. Apesar disso, a mistura 40% MDP e 30% PET foi classificada como composta por partículas finas, mantendo características adequadas para aplicações que requerem alta uniformidade granulométrica.

6.2 ENSAIOS FÍSICOS

Os principais fatores que influenciam a densidade dos painéis são o tempo, a pressão e a temperatura de prensagem e tipo de adesivo utilizado (Herradon, 2023).

A densidade dos painéis possui impacto direto na resistência à tração perpendicular (TP). Para a realização do ensaio de densidade, tanto nos painéis pós-consumo quanto nos novos painéis desenvolvidos, foram utilizados os mesmos corpos de prova empregados no ensaio de tração. As classificações normativas referentes à densidade estão apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Classificação normativa de painéis aglomerados com relação a densidade

Classificação	**NBR 14810-2 (2018)**
Baixa Densidade	D < 0,551
Média Densidade	0,551 < D > 0,750
Alta Densidade	D > 0,750

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14810-2 (2018)

A Tabela 16 apresenta: teor de umidade (U), inchamento após 24 horas (I24h), absorção de água após 24 horas (A24h), densidade (D) e classificação normativa. Dos resultados encontrados pelos autores usados como referências para comparação com os dados obtidos nesta pesquisa.

Tabela 16 – Ensaios físicos e classificação dos painéis das literaturas de comparação

Painel	U (%)	I24h (%)	A24h (%)	D (g/cm³)	Classificação
Spier (2024)	-	13 - 10	24 - 14	1,03 - 1,04	**Alta Densidade**
Herradon (2023)	4,08	17,43	38,52	1,031	**Alta Densidade**
Cazella (2022)	4,70	15,78	32,39	0,929	**Alta Densidade**
Moretto *et al.* (2020)	3,7 – 3,6	14 - 12	25 - 40	0,64 - 0,79	**Média/ Alta Densidade**
Rahman *et al.* (2018)	0,857	10,9	29,5	0,80 - 1,04	**Alta Densidade**
Zamarian *et al.* (2017)	-	11,60	37,26	0,714	**Média Densidade**
Weber e Iwakiri (2015)	8,6	16 – 10	29 – 25	0,74 - 0,68	**Média Densidade**

Fonte: adaptada autora (2024)

Já a Tabela 17 são apresentados os resultados médios (Xm), os coeficientes de variação (CV), o valor-p do teste de normalidade de Anderson-Darling (5% de significância) para a validação da análise de variância (ANOVA, 5% de significância) e os resultados do teste de contraste de média de Tukey (5% de significância) acerca das propriedades físicas dos painéis fabricados.

Tabela 17 – Resultado dos ensaios físicos e classificação dos painéis

Painel	U (%)	I24h (%)	A24h (%)	D (g/cm³)	Classificação
MDP (pós-consumo)	8,59 A	16,29 A	9,04 F	0,52 G	**Baixa Densidade**
100MDP	8,82 A	13,51 B	24,62 C	0,81 F	**Alta Densidade**
85MDP15PET	4,30 B	8,37 D	17,52 D	0,90 E	**Alta Densidade**
70MDP30PET	3,56 C	6,36 D	18,64 A	1,00 C	**Alta Densidade**
85MDP15BREU	3,73 C	18,72 A	30,01 B	0,91 D	**Alta Densidade**
70MDP30BREU	3,67 C	17,90 A	25,55 C	1,01 C	**Alta Densidade**
70MDP15PET15BREU	2,28 D	13,51 B	24,62 C	1,11 B	**Alta Densidade**
40MDP30PET30BREU	1,93 E	10,85 C	14,23 E	1,14 A	**Alta Densidade**

Legenda: Letras iguais nas linhas implicam misturas com médias de resultados estatisticamente equivalentes entre si.

Fonte: autora (2024)

6.2.1 DENSIDADE

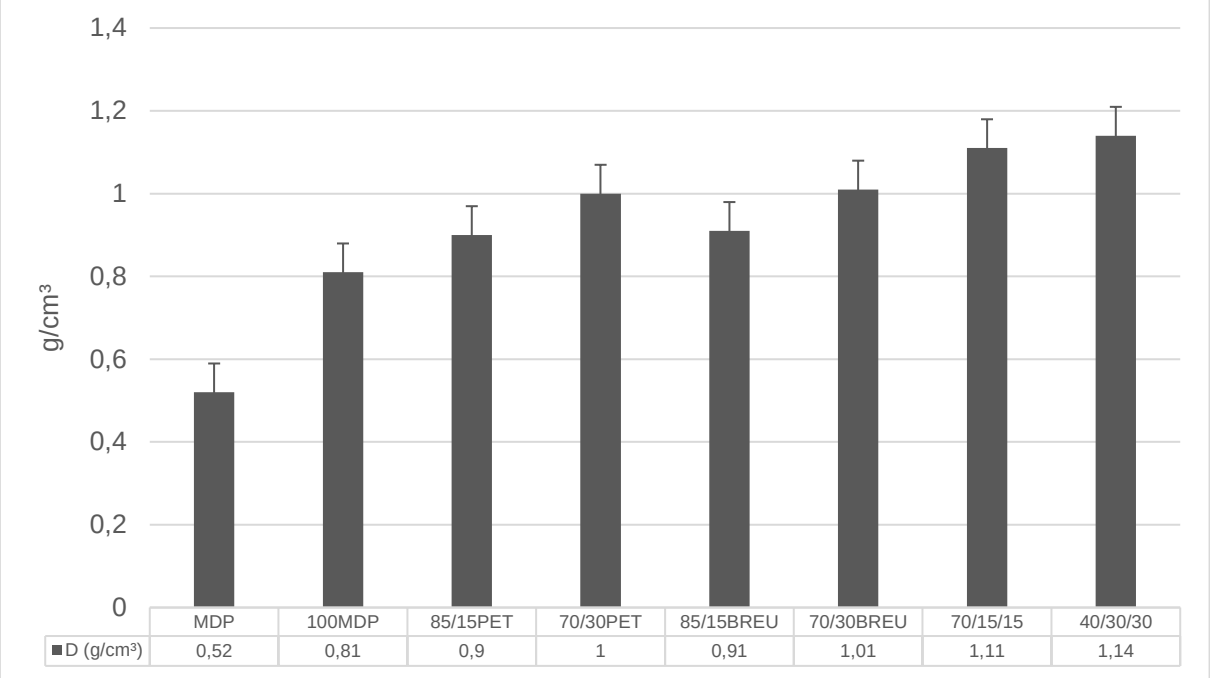
Os valores de densidade obtidos indicam que os painéis fabricados a partir de resíduos pós-consumo podem ser classificados como painéis de baixa densidade, de

acordo com os critérios estabelecidos na norma ABNT NBR 14810-2 (2018). Esse resultado pode estar associado à composição dos resíduos utilizados, incluindo o tipo e a quantidade de adesivo originalmente presente nos painéis, bem como aos padrões industriais adotados na sua fabricação (IWAKIRI, 2005; MALONEY, 1993).

Por outro lado, o painel composto por partículas de MDP, assim como aqueles contendo PET, breu e a combinação PET/breu, foram classificados como de alta densidade. Esse comportamento pode ser atribuído, principalmente, à influência do adesivo PUR utilizado como agente aglutinante em todas as formulações, além da incorporação dos aditivos PET e breu. Estudos anteriores indicam que a presença de polímeros, como o PET, pode contribuir para a densificação dos painéis devido à sua capacidade de preencher os espaços entre as partículas de madeira e modificar a compactação do material (CAZELLA, 2022; RODRIGUES *et al*., 2023).

Adicionalmente, os parâmetros de prensagem adotados podem ter influenciado significativamente a densidade final dos painéis, uma vez que o aumento da temperatura em relação a referências previamente estudadas favoreceu a compactação do material, promovendo uma maior interação entre as partículas de MDP e o PET (IWAKIRI *et al*., 2020). Conforme destacado por Araújo *et al.* (2019), a densidade dos painéis é diretamente influenciada pelas condições de prensagem, sendo a temperatura um fator determinante para a plasticização dos polímeros e a formação de ligações mais coesas entre as partículas. Outro fator relevante é a diferença na massa específica dos materiais constituintes, visto que o PET, enquanto polímero, apresenta uma densidade distinta quando comparada às partículas de madeira, o que pode ter contribuído para a variação observada nas propriedades físicas dos painéis (HERRADON, 2023).

Figura 38 - Densidade média dos painéis



Fonte: autora (2024)

Zamarian *et al*. (2017) obtiveram uma densidade de 0,714 g/cm³ para sua mistura composta por 100% de partículas de móveis descartados e 10% de resina UF, sendo este o maior valor registrado na pesquisa dos autores. Já Weber e Iwakiri (2015), ao utilizarem 100% de partículas de MDP aglutinadas com 10% e 6% de resina UF, encontraram densidades de 0,741 g/cm³ e 0,681 g/cm³, respectivamente. Esses estudos demonstram que o teor de adesivo influencia diretamente na densidade final dos painéis produzidos com partículas de móveis descartados. Na presente pesquisa, a mistura 100MDP apresentou uma densidade de 0,81 g/cm³, valor superior aos encontrados na literatura. Essa diferença pode ser atribuída ao adesivo utilizado, o poliuretano à base de óleo de mamona que, além de apresentar maior eficiência na adesão das partículas, foi empregado em uma proporção de 10%, favorecendo a compactação e a estabilidade do painel (IWAKIRI, 2005; MALONEY, 1993).

Rahman *et al.* (2018) produziram compósitos do tipo "madeira-plástico" empregando compressão plana e observaram que as densidades variaram de 0,801 g/cm³ a 1,047 g/cm³ para misturas contendo 70/30 e 40/60 (madeira/PET), respectivamente. Os autores constataram uma relação proporcional entre o aumento da densidade e do PET na composição. Esse comportamento foi semelhante ao registrado na presente pesquisa, onde as densidades de 0,9 g/cm³ e 1,0 g/cm³ foram obtidas para as misturas contendo 85/15PET e 70/30PET, respectivamente,

reforçando a influência da incorporação de PET no aumento da densidade dos compósitos (CAZELLA, 2022; RODRIGUES *et al*., 2023).

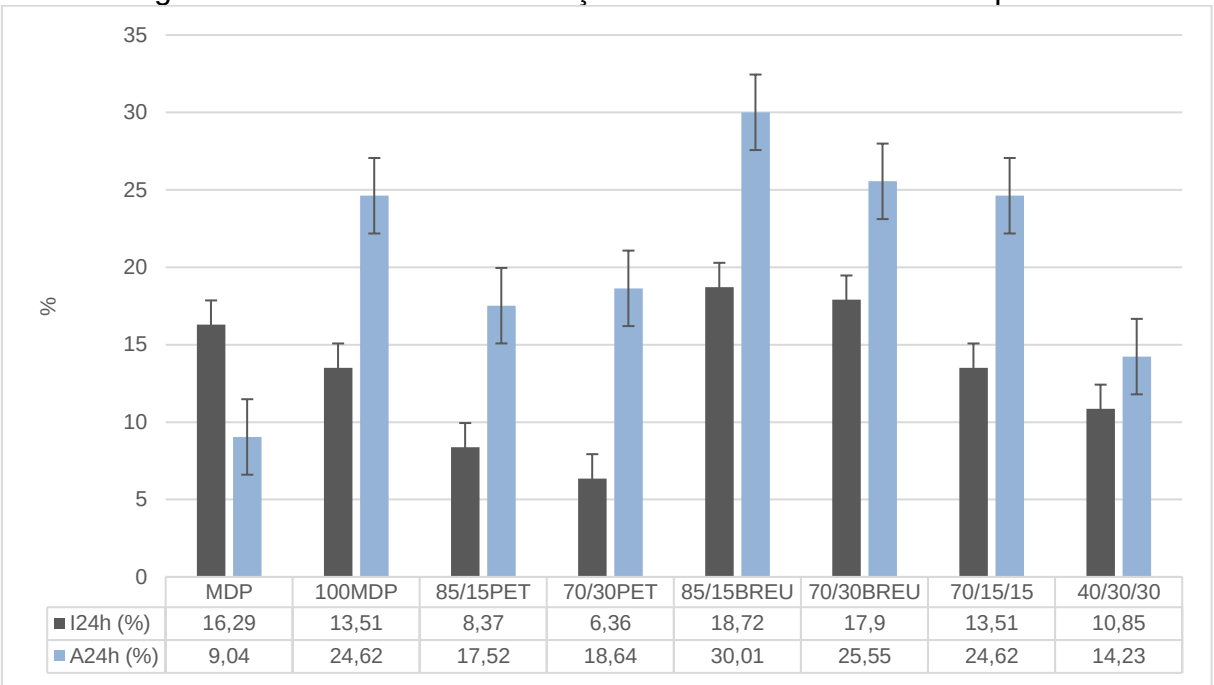
Moretto *et al*. (2020) produziram compósitos com 25% e 40% de resina de breu, obtendo densidades médias de 0,64 g/cm³ e 0,79 g/cm³, respectivamente. Os autores atribuíram essas densidades relativamente baixas ao tipo de partícula utilizada na pesquisa – fibra de coco – e ao fato de que o breu foi empregado como aglutinante, sem a presença de um adesivo sintético convencional. No presente estudo, o breu foi utilizado como aditivo, enquanto o PUR desempenhou o papel de adesivo principal. As misturas contendo 85/15breu e 70/30breu, tanto na formulação com PET quanto com breu, apresentaram densidades similares, evidenciando a relação entre o adesivo e a densidade final dos painéis (HERRADON, 2023; ARAÚJO *et al*., 2019).

Spier (2024) concluiu que a adição de breu em compósitos resultou em um aumento na densidade quando comparados à matriz polimérica, com valores variando entre 1,03 g/cm³ e 1,04 g/cm³. Esses resultados indicam que a combinação entre breu e polímero favorece a elevação da densidade dos painéis, comportamento também observado na presente pesquisa. As misturas que apresentaram as maiores densidades, 1,11 g/cm³ e 1,14 g/cm³, corresponderam às formulações 70/15PET/15breu e 40/30PET/30breu, respectivamente, confirmando a influência da composição na densidade final dos compósitos (SPIER, 2024; SOUZA *et al*., 2021).

6.2.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA E INCHAÇO EM ESPESSURA

Estudos realizados por Souza *et al*. (2021) e Gilio (2020) indicam que a redução do inchaço e da absorção de água nos painéis aglomerados está diretamente relacionada ao adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona. Esse adesivo proporciona tanto a impermeabilização quanto o envelopamento das partículas, reduzindo a interação do material com a água. Os resultados obtidos nos ensaios de inchamento em espessura e absorção após 24 horas são apresentados na Tabela 38.

Figura 39 - Inchamento e absorção médios em 24 horas dos painéis



	MDP	100MDP	85/15PET	70/30PET	85/15BREU	70/30BREU	70/15/15	40/30/30
I24h (%)	16,29	13,51	8,37	6,36	18,72	17,9	13,51	10,85
A24h (%)	9,04	24,62	17,52	18,64	30,01	25,55	24,62	14,23

Fonte: autora (2024)

Os painéis pós-consumo analisados apresentaram um inchamento em espessura de 16,29% após 24 horas e uma absorção de água de 9,04%, valores compatíveis com aqueles encontrados em processos industriais controlados e com o uso de adesivos amplamente empregados no setor (IWAKIRI, 2005).

Weber e Iwakiri (2015), ao reconstituírem novos painéis utilizando partículas de MDP aglutinadas com 6% e 10% de resina UF, obtiveram valores de absorção de 29,25% e 25,13%, respectivamente, e inchamentos de 16,65% e 10,51%. Esses resultados indicam que um maior teor de adesivo tende a reduzir o inchamento e a absorção de água nos painéis. Resultados semelhantes foram obtidos por Zamarian *et al*. (2017), que reportaram absorção de 37,26% e inchamento de 11,60% para misturas contendo 100% de partículas de móveis descartados e 10% de UF. Na presente pesquisa, a mistura 100MDP e 10% de PUR apresentou um inchamento de 13,51% e uma absorção de 24,62%, valores próximos aos relatados na literatura, evidenciando o papel do PUR na estabilização dimensional dos painéis.

Cazella (2022) demonstrou que a incorporação de PET em compósitos de 70% PET e 30% de partículas de pinus, combinados com 10% de PUR, melhora significativamente a resistência à água dos painéis. O PET atuou como um agente de preenchimento, reduzindo a porosidade interna dos compósitos, enquanto o PUR proporcionou um eficiente envelopamento das partículas. Na presente pesquisa,

observou-se uma redução expressiva no inchamento em espessura à medida que a proporção de PET aumentou. As misturas 85/15PET e 70/30PET apresentaram os menores valores de inchamento, 8,37% e 6,36%, respectivamente. Em relação à absorção de água, a mistura 85/15PET registrou um valor de 17,62%, enquanto a mistura 70/30PET apresentou um leve aumento, atingindo 18,64%. Esses resultados corroboram os achados de Cazella (2022), reforçando que o PET auxilia na redução da higroscopicidade dos painéis.

Moretto *et al.* (2020) investigaram o efeito do breu como aglutinante, obtendo valores médios de inchamento de 14,3% para compósitos contendo 25% de breu e 12,5% para aqueles com 40% de breu. Os autores atribuíram essa variação à capacidade do breu de atuar como um agente de preenchimento, reduzindo os espaços vazios no compósito. No entanto, os resultados da presente pesquisa indicam que, quando utilizado isoladamente, o breu não foi eficaz como aditivo hidrofóbico. As misturas contendo apenas breu, 85/15BREU e 70/30BREU, apresentaram os maiores valores de inchamento em espessura, 18,72% e 17,90%, respectivamente, e as maiores taxas de absorção, 30,01% e 25,55%. Esses resultados sugerem que a adição de um polímero, como o PET, ou o aumento da proporção de PUR seriam necessários para melhorar a resistência à umidade.

Cunha (2019) propôs uma abordagem alternativa para mitigar a absorção de água em compósitos contendo breu, utilizando-o como agente impermeabilizante externo. O autor realizou a moagem e posterior fusão do breu, aplicando-o na forma líquida sobre os corpos de prova, criando uma camada vitrificada que envolveu toda a superfície dos painéis e impediu a absorção de umidade.

Spier (2024) confirmou que a hidrofobicidade dos compósitos aumentou quando o breu foi combinado a polímeros, comportamento semelhante ao observado nas misturas 70/15/15 e 40/30/30 (MDP/PET/BREU) da presente pesquisa. Esses painéis apresentaram valores de inchamento de 13,51% e 10,85% após 24 horas, respectivamente, e taxas de absorção de 24,62% e 14,23%. Os resultados sugerem que a combinação entre PET e breu contribui para uma melhor estabilidade dimensional dos painéis, reduzindo seu potencial de absorção de água.

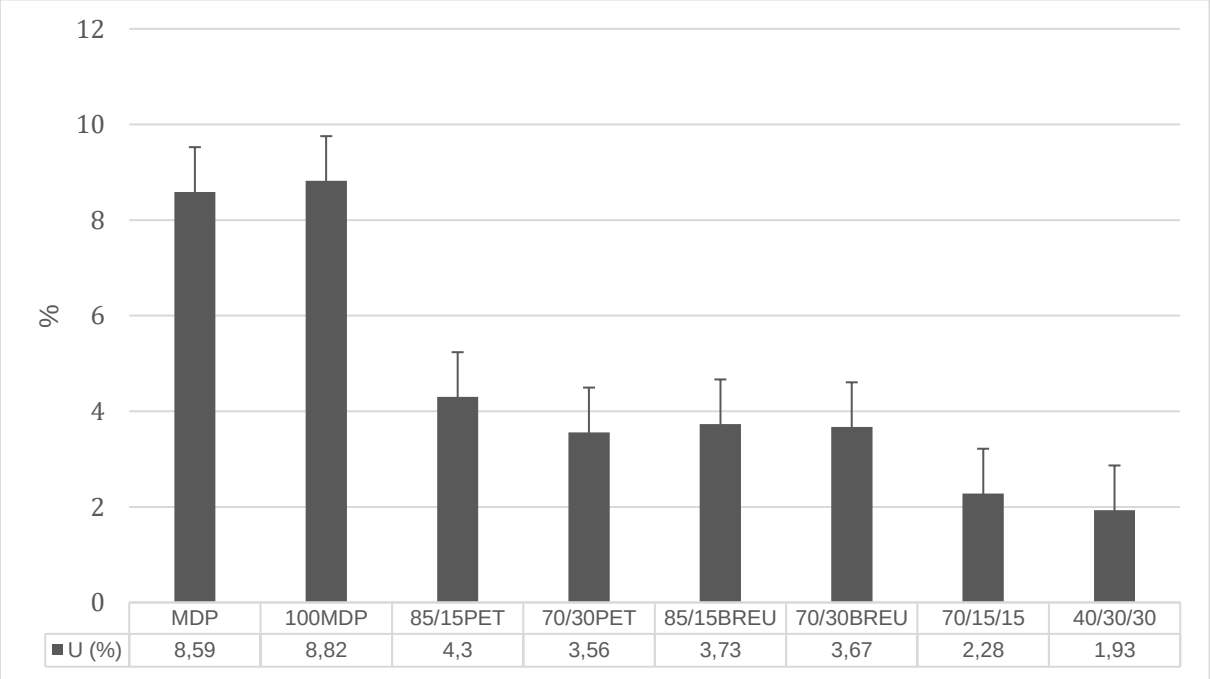
A norma ABNT NBR 14810-2 (2018) estabelece que a umidade dos painéis deve estar na faixa de 5% a 13% para garantir propriedades adequadas. No entanto, exceto pelos painéis compostos exclusivamente por MDP e aqueles com 100% de

partículas pós-consumo aglutinadas com 10% de PUR, todos os demais apresentaram teores de umidade abaixo desse intervalo normativo. Essa diferença pode ser atribuída à baixa capacidade de absorção de água do PET, bem como ao efeito do breu, que libera umidade significativa durante o processo de prensagem.

6.2.3 UMIDADE

O teor de umidade dos painéis pós-consumo, de 8,59%, encontra-se dentro do intervalo estabelecido pela norma ABNT NBR 14810-2 (2018) e é compatível com as condições de industrialização e armazenamento desses materiais. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que os painéis permaneceram protegidos em depósitos, sem exposição direta a intempéries e agentes externos que poderiam comprometer suas propriedades físicas e mecânicas (IWAKIRI, 2005).

Figura 40 - Umidade média dos painéis



Fonte: autora (2024)

Weber e Iwakiri (2015), ao analisarem painéis compostos por 100% de MDP, obtiveram teores de umidade de 8,67% e 8,65% para misturas contendo 6% e 10% de resina UF, respectivamente. Esses valores são próximos ao encontrado na presente pesquisa para a mistura 100% MDP e 10% de PUR, que registrou um teor de umidade de 8,82%. Esses resultados indicam que, independentemente do tipo de

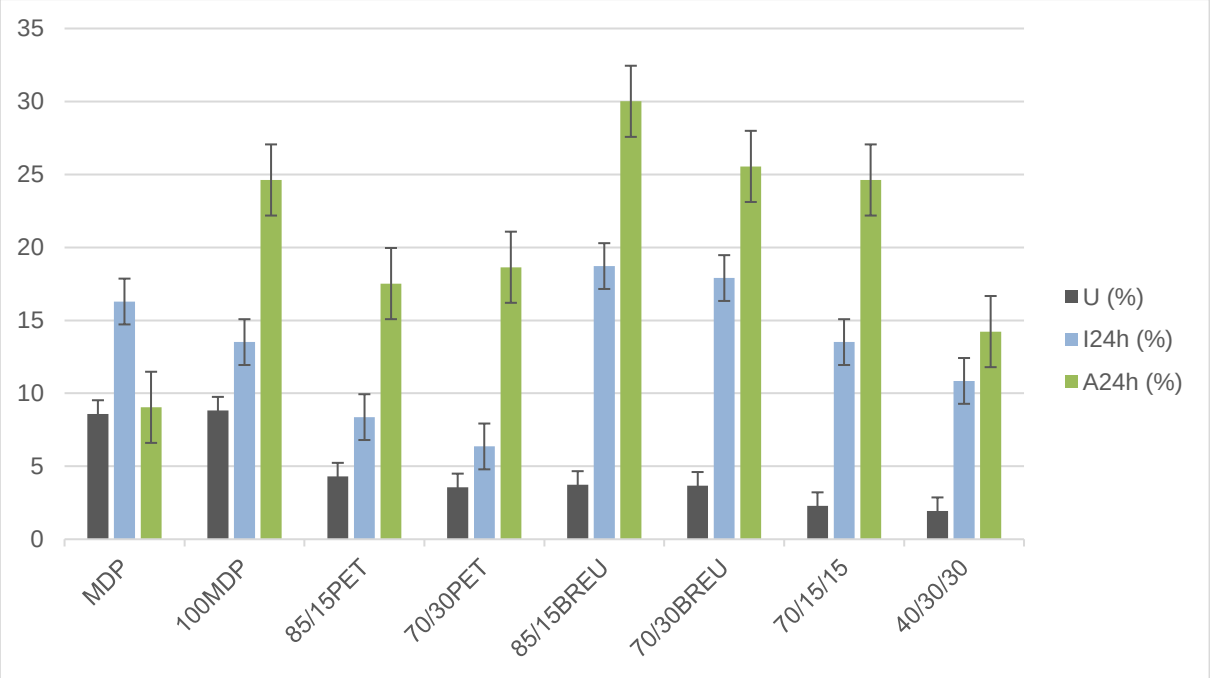
adesivo utilizado, a umidade dos painéis compostos exclusivamente por MDP tende a manter-se dentro da faixa recomendada pela norma, desde que as condições de armazenamento sejam adequadas.

Herradon (2023) observou que o teor de umidade dos painéis reduziu à medida que a proporção de PET foi aumentada. Essa tendência foi atribuída ao fato de o PET ser um material hidrofóbico, ou seja, de baixa absorção de umidade, além da ação do PUR, que contribui para o envelopamento das partículas, reduzindo sua capacidade de absorver água. Os resultados da presente pesquisa corroboram essa hipótese, uma vez que as misturas contendo PET apresentaram os menores valores de umidade. As formulações 85/15PET e 70/30PET registraram teores de umidade de 4,3% e 3,56%, respectivamente, confirmando a relação inversa entre a proporção de PET e o teor de umidade dos painéis.

As misturas contendo apenas breu também apresentaram baixos valores de umidade, com 3,73% e 3,67%, o que pode ser explicado pela ação conjunta do breu e do PUR no envelopamento das partículas, reduzindo a interação do material com a umidade ambiental. Os menores teores de umidade foram observados nas misturas que combinaram PET e breu, com valores de 2,28% e 1,93%, respectivamente. Esse comportamento sugere que a presença simultânea dos dois aditivos potencializa a hidrofobicidade dos painéis, minimizando a absorção de umidade e favorecendo a estabilidade dimensional do material (CAZELLA, 2022; IWAKIRI *et al*., 2020).

6.2.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS (UMIDADE, INCHAMENTO E ABSORÇÃO)

Figura 41 – Umidade, Inchamento e Absorção dos painéis



Fonte: autora (2024)

Os teores de umidade dos painéis apresentaram uma tendência de regressão linear, começando com os painéis pós-consumo, seguidos pela mistura 100MDP e 10% PUR, e diminuindo progressivamente com a incorporação dos aditivos. Observou-se que as misturas contendo 30% de aditivo apresentaram menores teores de umidade em comparação às misturas com 15% de aditivo. Os menores valores foram registrados nas misturas que combinaram PET e breu, reforçando a influência desses aditivos na redução da absorção de umidade devido às suas características hidrofóbicas (HERRADON, 2023; IWAKIRI *et al*., 2020).

Os valores de inchamento oscilaram de acordo com a composição dos painéis, sendo menores na presença de PET e PUR e mais elevados na presença exclusiva de breu. No entanto, quando PET e breu foram combinados, os valores de inchamento voltaram a diminuir, indicando que a proporção de PET na formulação desempenha um papel relevante na estabilização dimensional dos painéis. À medida que a concentração de PET aumentou, os painéis tornaram-se menos susceptíveis ao inchamento, corroborando com os achados de pesquisas anteriores que indicam a

baixa absorção de umidade do PET e sua capacidade de atuar como um agente de preenchimento eficiente (CAZELLA, 2022; RODRIGUES *et al*., 2023).

Os painéis pós-consumo apresentaram os maiores valores de inchamento em relação às demais propriedades avaliadas. Esse comportamento pode ser atribuído à ausência de aditivos na formulação original, bem como ao tipo de adesivo utilizado nesses painéis, que possivelmente diferia do PUR empregado na presente pesquisa. Como consequência, esses painéis demonstraram uma maior susceptibilidade à absorção de umidade e à variação dimensional.

Dentre as propriedades analisadas, a absorção de água foi a que apresentou maior impacto negativo nos painéis desenvolvidos. O maior valor registrado foi observado na mistura contendo 15% de breu, sugerindo que o breu, quando utilizado isoladamente, não foi eficaz na redução da absorção e do inchamento dos painéis. No entanto, quando combinado a um polímero, como o PET, os resultados físicos foram significativamente melhores. Isso reforça a necessidade de utilizar o breu como um aditivo complementar, associado a materiais que promovam maior impermeabilidade e estabilidade dimensional (MORETTO *et al.,* 2020; SPIER, 2024).

Com base na Figura 40, é possível inferir que as melhores formulações em termos de desempenho físico foram:

- **70% MDP e 30% PET, com 10% de PUR**
- **70% MDP, 15% PET e 15% Breu, com 10% de PUR**
- **40% MDP, 30% PET e 30% Breu, com 10% de PUR**

Essas composições apresentaram os melhores resultados em relação à umidade, inchamento e absorção, destacando-se como opções promissoras para aplicações que demandam maior estabilidade dimensional e resistência à umidade.

6.3 ENSAIOS MECÂNICOS

A Tabela 18 apresenta: módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e resistência a tração perpendicular (TP). Resultados encontrados pelos autores referências para comparação com os dados obtidos nesta pesquisa.

Tabela 18 – Ensaios físicos e classificação dos painéis das literaturas

Painel	MOR (MPa)	MOE (MPa)	TP (MPa)
Spier (2024)	-	337,86 - 320,76	11 – 9,07
Herradon (2023)	8,81	992,78	0,97
Cazella (2022)	19,74	2558,94	0,89
Moretto *et al*. (2020)	-	-	-
Rahman *et al*. (2018)	11,68	1433,93	-
Zamarian *et al*. (2017)	11,36	1701	0,54
Weber e Iwakiri (2015)	6,47	1185,43	0,75

Fonte: adaptada autora (2024)

Já na Tabela 19 são apresentados os resultados médios (Xm), os coeficientes de variação (CV), o valor-p do teste de normalidade de Anderson-Darling (5% de significância) para a validação da análise de variância (ANOVA, 5% de significância) e os resultados do teste de contraste de média de Tukey (5% de significância) acerca das propriedades físicas dos painéis fabricados.

Tabela 19 – Resultado dos ensaios mecânicos

Painel	MOR (MPa)	MOE (MPa)	TP (MPa)
MDP (pós-consumo)	14,83 D	2199 B	0,89 C
100MDP	26,06 B	3224 A	1,18 C
85MDP15PET	32,89 A	861 D	2,01 A
70MDP30PET	35,41 A	1184 D	2,32 A
85MDP15BREU	25,88 B	2922 A	1,05 C
70MDP30BREU	19,85 C	2298 B	0,43 D
70MDP15PET15BREU	23,58 B	1656 C	1,52 B
40MDP30PET30BREU	14,82 D	2224 B	0,40 D

Legenda: Letras iguais nas linhas implicam misturas com médias de resultados estatisticamente equivalentes entre si.

Fonte: autora (2024)

6.3.1 MÓDULO DE RUPTURA (MOR)

Os dados apresentados na Figura 42 evidenciam que todas as misturas que incluíram partículas pós-consumo e PET resultaram em valores do Módulo de Ruptura (MOR) superiores àqueles observados em painéis sem PET, com breu ou contendo a

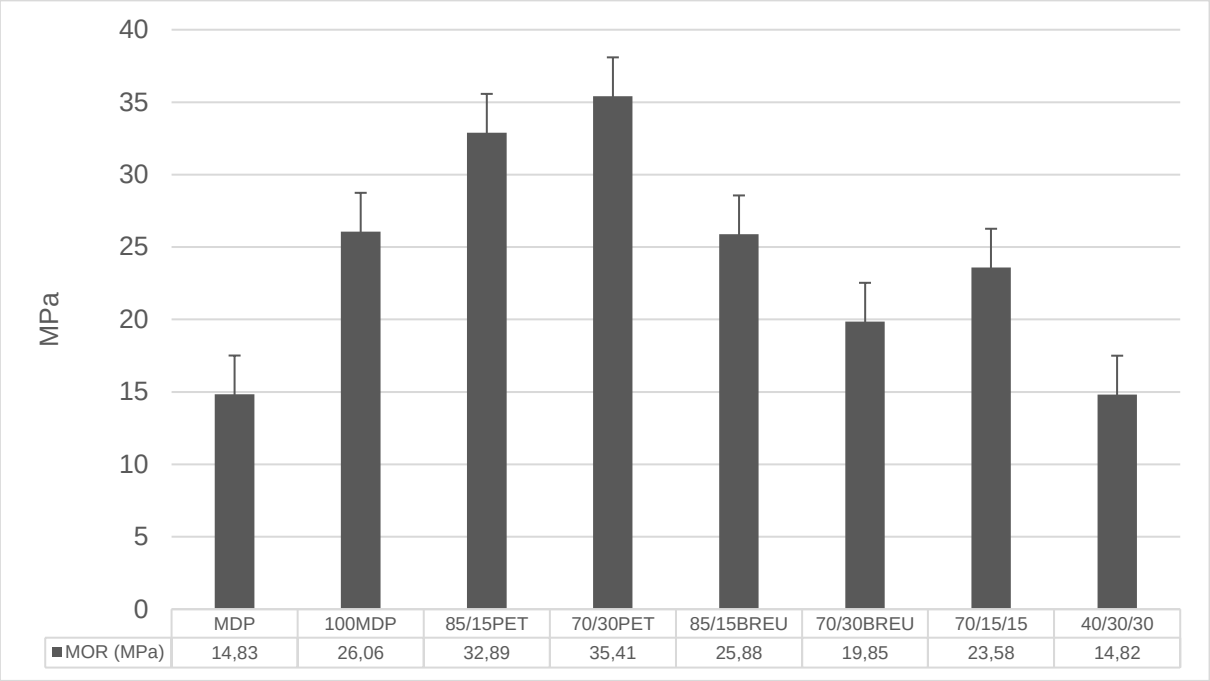
combinação dos dois aditivos. Esse comportamento também foi identificado por Herradon (2023), que verificou um aumento progressivo do MOR conforme a proporção de PET na composição dos painéis foi elevada. Esse resultado pode ser atribuído ao efeito do PET que promoveu uma maior coesão entre as partículas e influenciou positivamente as propriedades mecânicas (CAZELLA, 2022).

Os painéis pós-consumo apresentaram os menores valores de MOR, possivelmente devido à ausência de aditivos como o PET, que desempenha um papel fundamental na melhoria das características mecânicas dos compósitos. Em contrapartida, os painéis com 100% de MDP e 10% de PUR obtiveram um MOR de 26,06 MPa, um aumento expressivo em comparação ao material de origem. Esse comportamento pode ser explicado pela influência da resina aglutinante e pela variação da densidade dos painéis, fatores que afetam diretamente as propriedades mecânicas, conforme destacado por Cravo *et al.* (2017).

Os valores obtidos nesta pesquisa foram significativamente superiores aos relatados por Weber e Iwakiri (2015), que encontraram um MOR médio de 6,47 MPa e 4,93 MPa para misturas contendo 100% de MDP com 10% e 6% de resina UF, respectivamente. Esses resultados sugerem que a substituição do adesivo UF pelo PUR pode ter contribuído para a melhora substancial na resistência mecânica dos painéis, além do efeito benéfico da compactação do material durante a prensagem.

Zamarian *et al*. (2017), ao analisarem painéis produzidos com 100% de partículas de móveis descartados e 10% de UF, encontraram um MOR de 11,36 MPa, valor consideravelmente inferior aos 26,06 MPa alcançados na presente pesquisa para a mistura 100% MDP e 10% PUR. Esse resultado reforça a hipótese de que a escolha do adesivo e os parâmetros de processamento influenciam diretamente no desempenho mecânico dos painéis (IWAKIRI *et al*., 2020).

Figura 42 – Módulo de Ruptura médio dos painéis



Fonte: autora (2024)

Nos estudos de Cazella (2022), onde seus painéis constituídos de 50% *pinus* 50% PET apresentaram um aumento de 112,79% de MOR, em relação aos painéis referência, constituídos por apenas *pinus* e adesivo. Nota-se que há um expressivo aumento de MOR conforme o PET é acrescentado, assim como houve aumento de MOR entre a mistura 85/15PET que atingiu 32,89 MPa para os 35,41 MPa da mistura 70/30PET desta pesquisa.

Perante estudos de Rahman *et al* (2013), os autores obtiveram 11,68 MPa de MOR para proporção de 70% de pó de serra e 30% de PET. Enquanto na presente pesquisa, os painéis com as misturas envolvendo somente PET e até as misturas com 70/15PET/15BREU e 40/30PET/30BREU que alcançaram 23,58 MPa e 14,82 MPa foram superiores aos resultados dos autores.

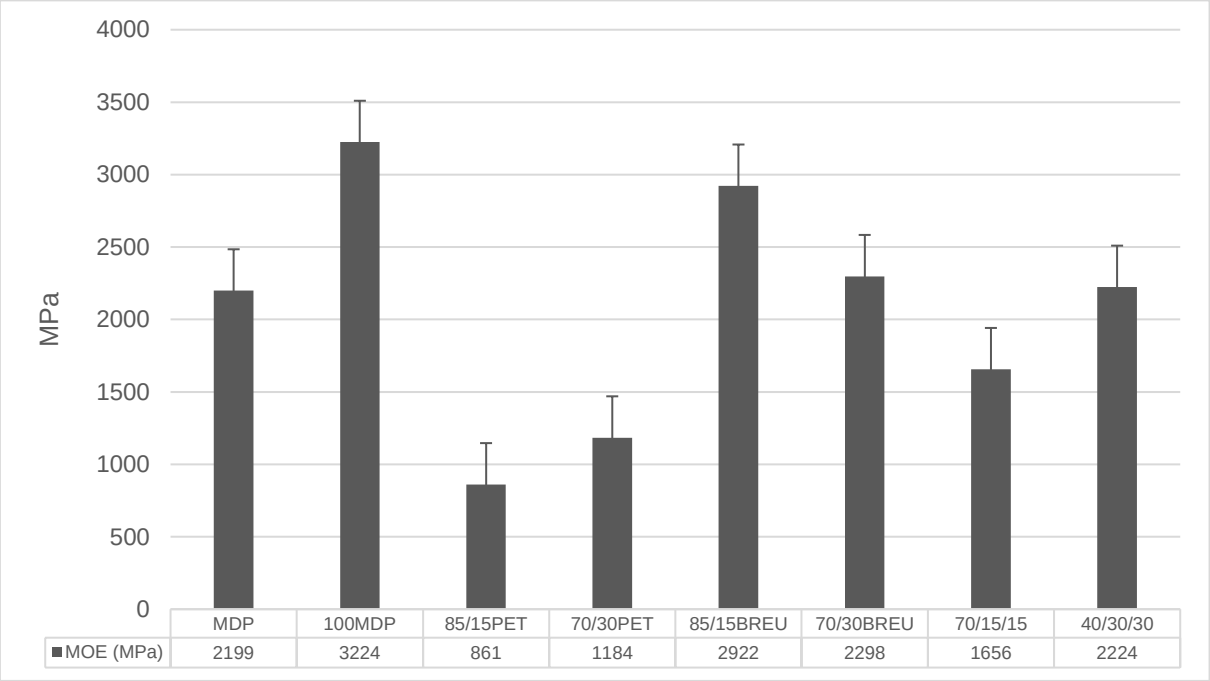
Conforme houve acréscimo de breu, os resultados de MOR diminuíram, inclusive, nas misturas com PET. O maior valor de MOR das misturas com breu, 25,88 MPa, foi na composição com penas 15% do aditivo. A mistura com 30% de breu teve uma queda considerável no valor, ficando em 19,85 MPa. A mistura com 30% de breu e 30% de PET atingiu um resultado de MOR próximo ao dos painéis pós-consumo. Isso pode ser um indicativo de que o Breu influencia negativamente no módulo de ruptura dos painéis, provavelmente pela sua propriedade vítrea.

6.3.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE)

A análise do Módulo de Elasticidade (MOE), ilustrada na Figura 43, revelou que os painéis 100MDP e aqueles com 10% de aditivo apresentaram os melhores desempenhos mecânicos. Em seguida, destacaram-se os painéis formulados com misturas contendo breu, seguidos pelas combinações de PET e breu. Por fim, os painéis que utilizaram exclusivamente PET como aditivo apresentaram os menores valores de MOE, indicando uma menor rigidez estrutural.

Segundo Iwakiri e Trianoski (2020), a incorporação de partículas recicladas em substituição à madeira pode representar uma alternativa economicamente viável para a produção de painéis aglomerados, uma vez que o polietileno tereftalato (PET) é um resíduo amplamente disponível e de baixo valor agregado. Essa substituição parcial da madeira pode reduzir os custos de produção dos painéis, promovendo não apenas a viabilidade econômica da indústria moveleira, mas também a sustentabilidade ambiental ao reutilizar um resíduo de difícil degradação. Além disso, estudos recentes indicam que a adição de PET pode influenciar as propriedades mecânicas dos painéis, particularmente no que tange ao equilíbrio entre resistência e flexibilidade (Cazella, 2022; Sugahara *et al*., 2018). Assim, a avaliação dos resultados obtidos neste estudo demonstra a relevância da composição dos painéis para a definição de seu desempenho estrutural, reforçando a necessidade de uma abordagem criteriosa na formulação de misturas que conciliem viabilidade técnica e sustentabilidade.

Figura 43 – Módulo de Elasticidade médio dos painéis



Fonte: autora (2024)

A análise do Módulo de Elasticidade (MOE) revelou que os painéis pós-consumo, ao atingirem um valor de 2199 MPa, se enquadraram no mínimo exigido para um dos tipos de painéis conforme a classificação normativa brasileira. Esse desempenho pode ser atribuído ao controle rigoroso dos processos industriais na fabricação original, bem como à adequada armazenagem dos painéis pós-consumo, fatores que preservam as propriedades mecânicas do material reciclado.

Comparando os resultados deste estudo com os de pesquisas anteriores, observa-se que os valores de MOE obtidos por Zamarian *et al.* (2017) para painéis compostos por 100% de móveis descartados e 10% de adesivo ureia-formaldeído (UF) foram de 1701 MPa, enquanto os módulos de elasticidade reportados por Weber e Iwakiri (2015) variaram entre 1185,43 MPa e 882,96 MPa para misturas contendo 10% e 6% de adesivo UF, respectivamente. Esses valores estão consideravelmente abaixo dos 3224 MPa registrados para os painéis 100MDP com 10% de poliuretano à base de óleo de mamona (PUR) neste estudo. Tais discrepâncias reforçam a influência determinante tanto do método de produção quanto do tipo de adesivo empregado na resistência mecânica dos painéis, conforme já destacado por Iwakiri e Trianoski (2020). Além disso, a adição de aditivos deve ser criteriosamente avaliada, pois seus efeitos variam conforme a proporção utilizada e a propriedade específica do painel que se deseja otimizar.

No estudo de Rahman *et al.* (2013), compósitos formados por pó de serra e PET reciclado, na proporção de 70/30 (pó/PET) e sem a adição de aglutinantes, apresentaram um MOE de 1433,93 MPa. Em comparação, nesta pesquisa, as misturas 85/15PET e 70/30PET resultaram em módulos de elasticidade de 861 MPa e 1184 MPa, respectivamente, indicando uma queda significativa no MOE com a incorporação de PET. Esse fenômeno pode ser explicado pelo comportamento do PET como um agente aglutinante, que promove coesão entre as partículas e acaba atuando diretamente na rigidez do painel.

No caso das misturas contendo breu, os resultados apontam que quanto menor a proporção do aditivo, maior a elasticidade do painel. As misturas 85/15BREU e 70/30BREU apresentaram valores de MOE de 2922 MPa e 2298 MPa, respectivamente. Esses dados sugerem que o breu contribui para a elasticidade dos painéis, mas há um limite para sua incorporação. O percentual de 15% parece ser o mais adequado, pois um aumento para 30% resultou na redução do módulo de elasticidade, evidenciando um efeito negativo na elasticidade.

Os resultados de Spier (2024) corroboram essa tendência. Em seu estudo, compósitos contendo polímero e breu, na proporção de 67/30 (polímero/breu), apresentaram valores de MOE entre 337,87 MPa e 320,76 MPa, com tempos de produção de 5 e 10 minutos. Esses achados indicam que a combinação polímero-breu pode contribuir para a melhoria do módulo de elasticidade, alinhando-se aos resultados obtidos na presente pesquisa para a mistura 40/30PET/30BREU, que atingiu 2224 MPa. A influência dos componentes na elasticidade do painel também foi observada na formulação 70/15PET/15BREU, que alcançou apenas 1656 MPa. Neste caso uma proporção reduzida de PET e breu comprometeram o MOE do painel. O menor valor de MOE, por sua vez, foi registrado para a mistura 85/15PET, ficando abaixo dos requisitos mínimos estabelecidos pela norma brasileira, reforçando a necessidade de ajustes nas proporções dos componentes para garantir um desempenho adequado.

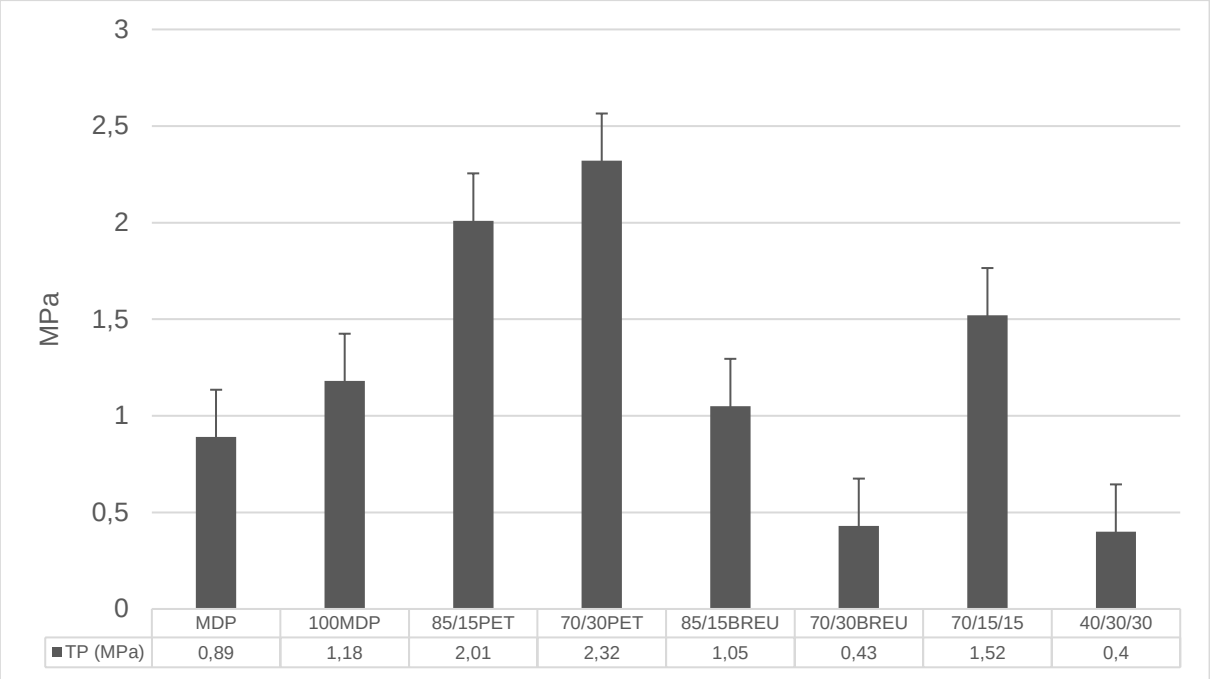
6.3.3 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO PERPENDICULAR (TP)

Maloney (1993) destaca que a qualidade da adesão entre as partículas é um fator determinante para a resistência à tração perpendicular (TP) dos painéis e esta diretamente ligada a quantidade e o desempenho do adesivo utilizado. De maneira

semelhante ao comportamento observado para as resistências à flexão estática (MOR) e ao módulo de elasticidade (MOE).

Os resultados indicam que a resistência à tração perpendicular (TP) aumentou conforme houve um acréscimo na proporção de partículas de PET. No entanto, essa tendência não se manteve nas formulações em que o PET foi combinado com breu, sugerindo que a interação entre esses materiais pode comprometer a coesão estrutural dos painéis, possivelmente devido a diferenças na adesão e compatibilidade química entre os componentes.

Figura 44 – Resistência à Tração Perpendicular média dos painéis



Fonte: autora (2024)

Os painéis pós-consumo do tipo MDP apresentaram uma resistência à tração perpendicular (TP) de 0,89 MPa, possivelmente em função do tipo de adesivo industrial empregado e do controle mecanizado e parametrizado durante a fabricação dos painéis. No entanto, ao serem transformados em partículas e recompostos com a adição de 10% de resina poliuretana à base de óleo de mamona (PUR), resultando na formulação 100MDP, a resistência à tração perpendicular foi elevada para 1,18 MPa, evidenciando a eficácia do adesivo PUR na coesão estrutural do material.

Cazella (2022) verificou que a incorporação de PET, em substituição às de pinus, promove um aumento na resistência à tração perpendicular, uma vez que, ao ser submetido ao calor, o PET atua como um aglutinante, integrando-se às partículas de madeira. Além disso, a utilização do PUR como adesivo potencializou essa

melhoria. Na presente pesquisa, os resultados corroboram essa tendência, uma vez que a maior resistência à tração perpendicular foi observada na formulação 70/30PET, que atingiu 2,32 MPa, seguida pela mistura 85/15PET, com 2,01 MPa. De modo geral, as misturas com PET destacaram-se com relação a tração perpendicular, evidenciando o material como uma alternativa viável para aditivação de painéis.

Por outro lado, a adição isolada de breu como aditivo resultou em uma redução expressiva na resistência à tração perpendicular, conforme sua proporção foi aumentada. Os valores passaram de 1,05 MPa para 0,43 MPa nas misturas 85/15BREU e 70/30BREU, respectivamente. Um comportamento semelhante foi observado nas misturas que combinaram PET e breu, onde a formulação 70/15PET/15BREU apresentou uma TP de 1,52 MPa, enquanto a mistura 40/30PET/30BREU obteve apenas 0,40 MPa. Essa queda acentuada pode estar associada à interferência do breu nas propriedades adesivas do PUR, indicando que teores superiores a 15% desse aditivo podem comprometer a coesão do painel e reduzir significativamente sua resistência à tração perpendicular.

6.3.4 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS (MÓDULOS DE RUPTURA, ELASTICIDADE E TRAÇÃO PERPENDICULAR)

A análise da Tabela 19 revela que o módulo de ruptura (MOR) apresentou um aumento progressivo com a incorporação do adesivo à base de óleo de mamona (PUR), sendo ainda mais elevado nas misturas aditivadas com PET. No entanto, ao se utilizar exclusivamente o breu como aditivo, observou-se um comportamento inverso, com uma redução nos valores de MOR. Esse efeito foi parcialmente mitigado na formulação que combinou 15% de breu e 15% de PET, onde o MOR voltou a crescer. Entretanto, na mistura contendo 30% de breu e 30% de PET, os valores diminuíram novamente, indicando que o breu não é um aditivo adequado para o aprimoramento da resistência dos painéis aglomerados.

O módulo de elasticidade (MOE) também foi positivamente impactado pela utilização do adesivo PUR, conforme demonstrado pela diferença entre os painéis pós-consumo e a formulação 100MDP com 10% de PUR, que obteve o melhor desempenho na pesquisa. A adição exclusiva de PET resultou em uma redução acentuada do MOE, como visto na mistura 85/15PET, que ficou abaixo do limite normativo, mas os resultados melhoraram na proporção de 70/30PET, mesmo assim

permaneceu abaixo da classificação normativa. A incorporação isolada de breu se mostrou eficaz, na qual menores quantidades de aditivo proporcionaram um melhor desempenho. A mistura 70/15PET/15BREU apresentou um MOE bem próximo ao mínimo exigido pela norma brasileira, quando a porcentagem dos aditivos foi dobrada na formulação 40/30PET/30BREU o módulo de elasticidade cresceu.

A resistência à tração perpendicular (TP) foi significativamente incrementada com a utilização do PUR como adesivo, conforme evidenciado pela melhoria dos valores obtidos entre os painéis pós-consumo e a formulação 100MDP com 10% de PUR. A TP aumentou exponencialmente com a adição de PET, corroborando os achados de Cazella (2022), que apontam que maiores proporções de PET resultam em uma resistência superior. Em contrapartida, a relação entre TP e a adição de breu demonstrou um comportamento oposto, uma vez que a formulação com menor teor do aditivo (85/15BREU) apresentou melhor desempenho em comparação à mistura 70/30BREU. Entre as formulações que combinaram PET e breu, a mistura 70/15PET/15BREU obteve um desempenho significativamente superior ao da 40/30PET/30BREU, sugerindo que o aumento da quantidade de breu interferiu negativamente nas propriedades do PUR. Assim, os resultados indicam que o breu não é um aditivo adequado para a melhoria da resistência à tração dos painéis.

Com base na análise das propriedades mecânicas, conclui-se que a formulação mais adequada para o desenvolvimento de painéis aglomerados foi:

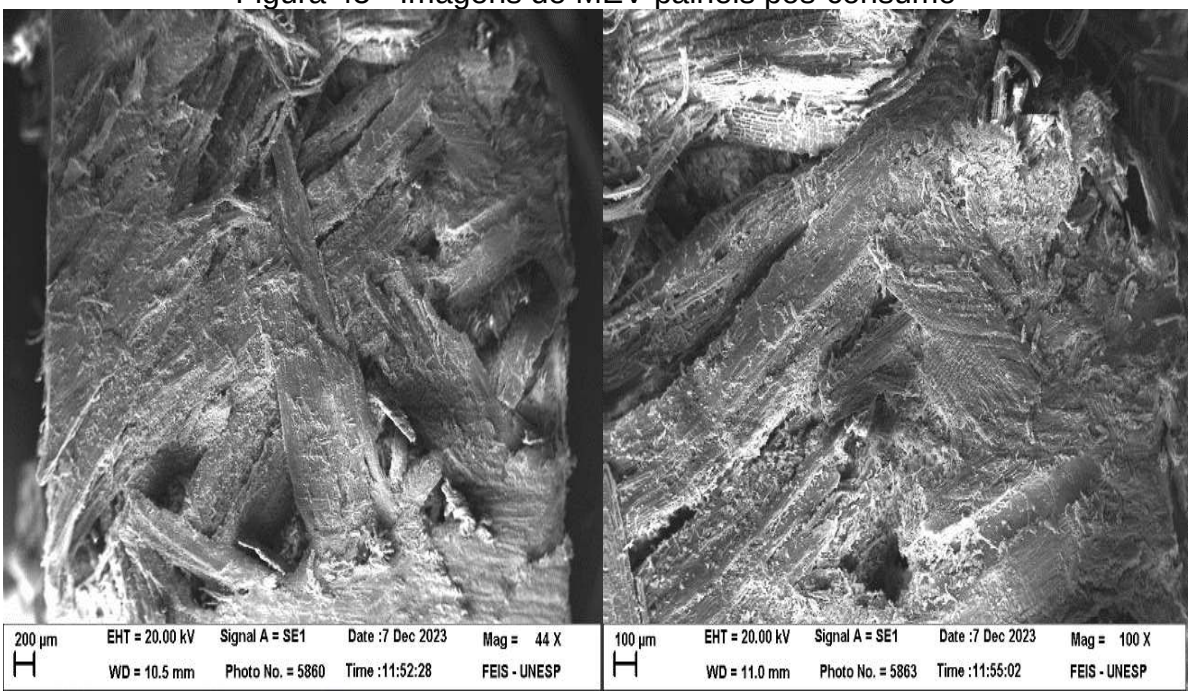
- **100% MDP com 10% de PUR.**

6.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A análise das micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permitiu uma avaliação detalhada da superfície dos corpos de prova de cada painel após a ruptura nos ensaios mecânicos. Essa abordagem possibilitou a observação da interface entre as partículas de madeira, os aditivos incorporados e o adesivo utilizado na formulação dos painéis. Estudos anteriores destacam a relevância da caracterização microestrutural para a compreensão do desempenho mecânico dos compósitos lignocelulósicos, uma vez que a distribuição e a adesão das partículas influenciam diretamente as propriedades estruturais do material (IWAKIRI, 2005; WEBER; IWAKIRI, 2015). Dessa forma, a inspeção via MEV contribui para a

identificação de falhas na coesão interna dos painéis e fornece subsídios para a otimização de sua formulação e processo de fabricação.

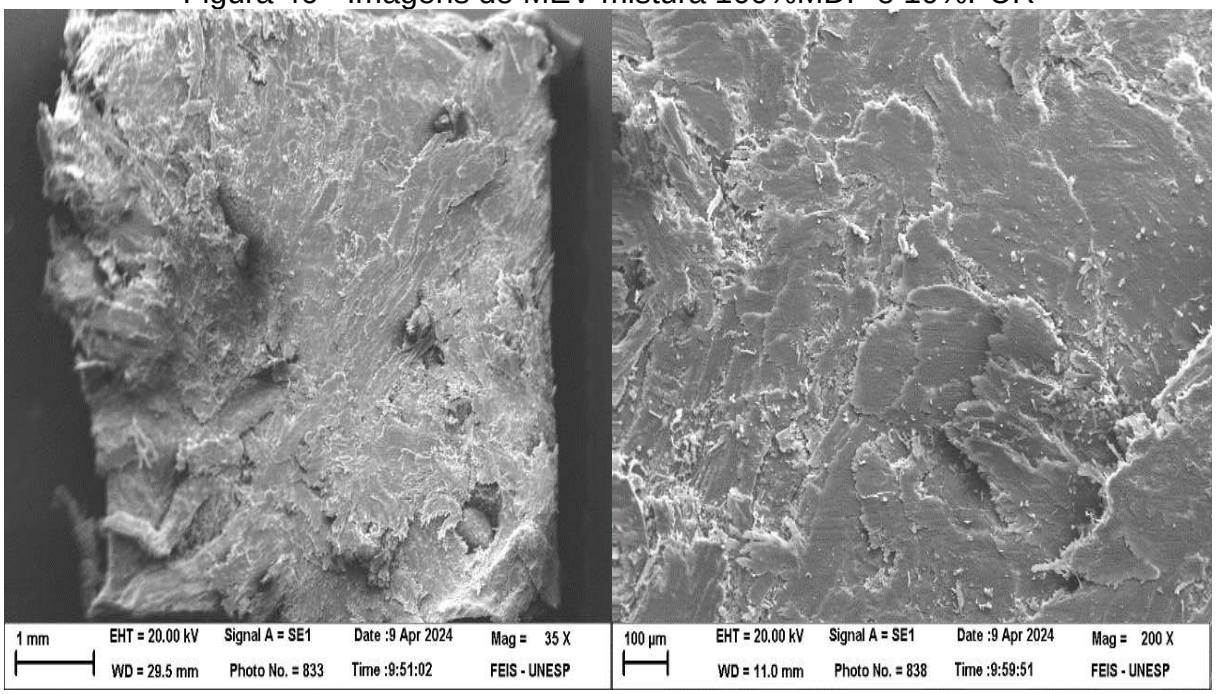
Figura 45 - Imagens de MEV painéis pós-consumo



Fonte: autora (2024)

A análise da Figura 45 evidencia a presença de uma elevada quantidade de vazios entre as partículas que compõem o painel de MDP, bem como uma reduzida quantidade de adesivo industrial na interface dessas partículas. Essa configuração estrutural corrobora os resultados dos ensaios de inchamento e absorção de água, os quais apresentaram valores elevados, indicando uma maior susceptibilidade à umidade. A porosidade observada favorece a percolação de água entre os espaços vazios, aumentando a interação da umidade com as partículas de madeira e comprometendo a estabilidade dimensional do material. Conforme apontado por Iwakiri (2005), a distribuição inadequada do adesivo pode impactar negativamente as propriedades físicas e mecânicas dos painéis, reduzindo sua resistência à degradação por umidade e influenciando seu desempenho em aplicações estruturais. Dessa forma, a caracterização microestrutural reforça a necessidade de ajustes na formulação do adesivo e nos parâmetros de fabricação para minimizar os efeitos adversos da absorção de água e do inchamento dos painéis.

Figura 46 - Imagens de MEV mistura 100%MDP e 10%PUR

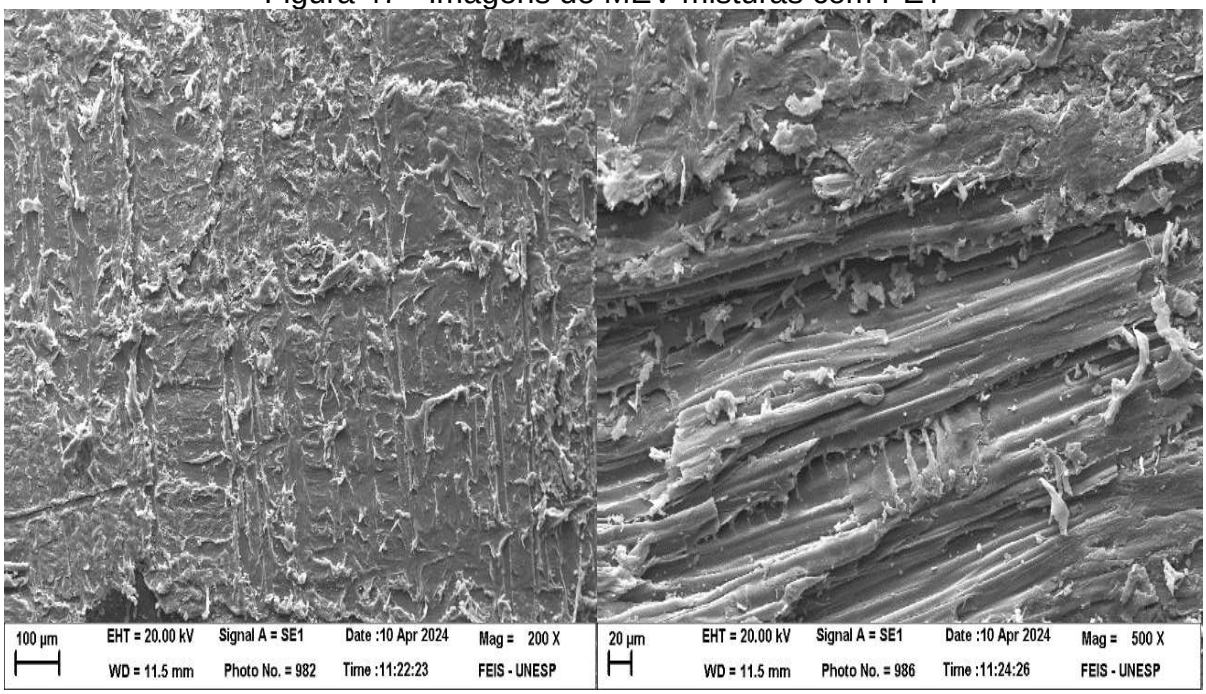


Fonte: autora (2024)

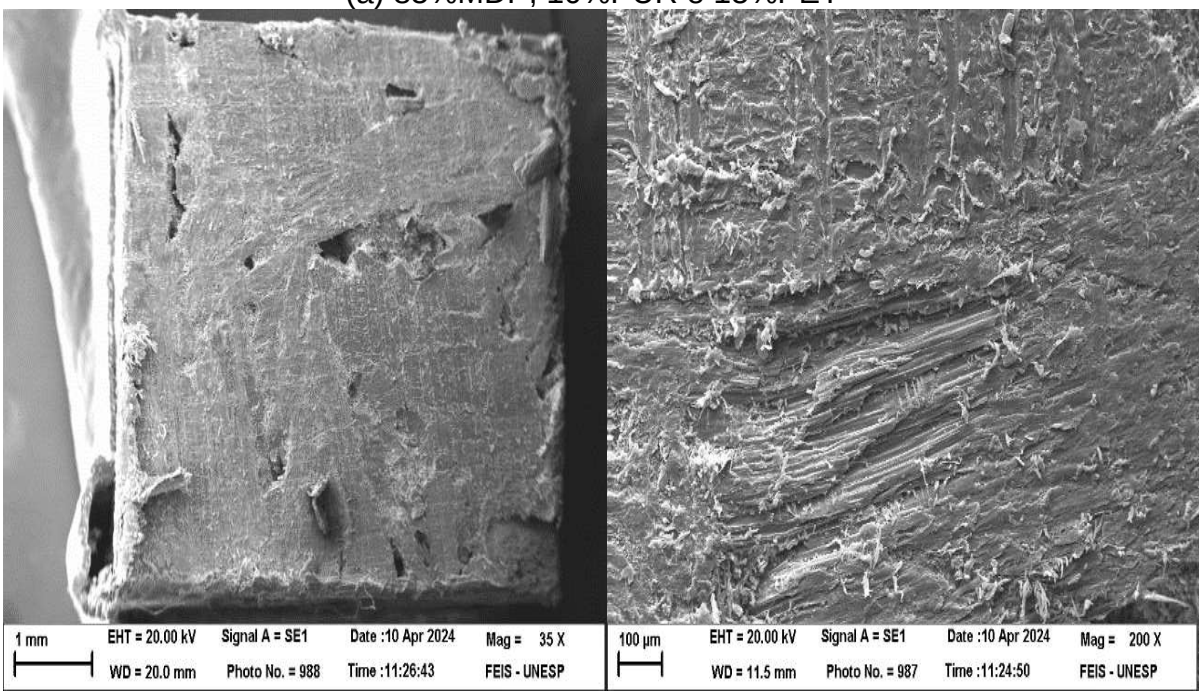
A Figura 46 apresenta a micrografia da mistura composta por 100% de partículas pós-consumo e 10% de adesivo à base de óleo de mamona. Observa-se uma redução significativa na quantidade de vazios em comparação ao painel de MDP convencional, o que pode ser atribuído à menor granulometria das partículas, que permitiu um melhor preenchimento dos espaços internos. Além disso, a eficiência do adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (PUR) na aglutinação das partículas foi determinante para essa melhoria estrutural.

Essa configuração explica o comportamento observado nos ensaios de absorção de água e inchamento, nos quais a absorção foi superior ao inchamento. A presença de uma menor quantidade de vazios reduziu a capacidade de expansão do material quando em contato com a umidade, enquanto a boa coesão entre partículas e adesivo restringiu variações dimensionais excessivas. Estudos anteriores demonstram que a redução de vazios e a escolha de um adesivo de alta eficiência resultam em materiais com maior estabilidade dimensional, minimizando problemas estruturais associados à umidade (IWAKIRI, 2005; CAZELLA, 2022). Dessa forma, os resultados indicam que a combinação de partículas pós-consumo de menor granulometria com o adesivo PUR pode representar uma alternativa viável para a produção de painéis aglomerados com desempenho aprimorado em relação à absorção de umidade e estabilidade dimensional.

Figura 47 - Imagens de MEV misturas com PET



(a) 85%MDP, 10%PUR e 15%PET



(b) 70%MDP, 10%PUR e 30%PET

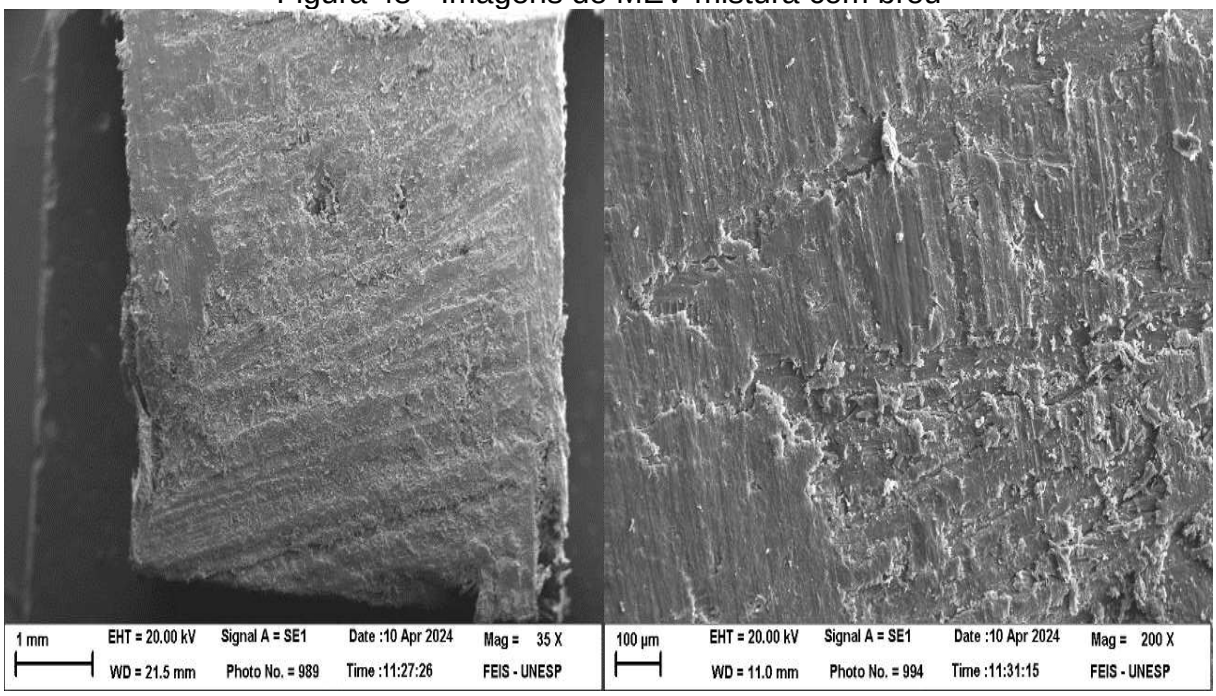
Fonte: autora (2024)

As micrografias das misturas 85/15PET (Figura 47a) e 70/30PET (Figura 47b) evidenciam uma redução significativa na quantidade de vazios, o que pode ser atribuído não apenas à ação do adesivo, que aglutinou as partículas de forma eficiente, mas também ao comportamento do PET durante o processo de prensagem. A alta temperatura aplicada na prensagem possivelmente promoveu o amolecimento

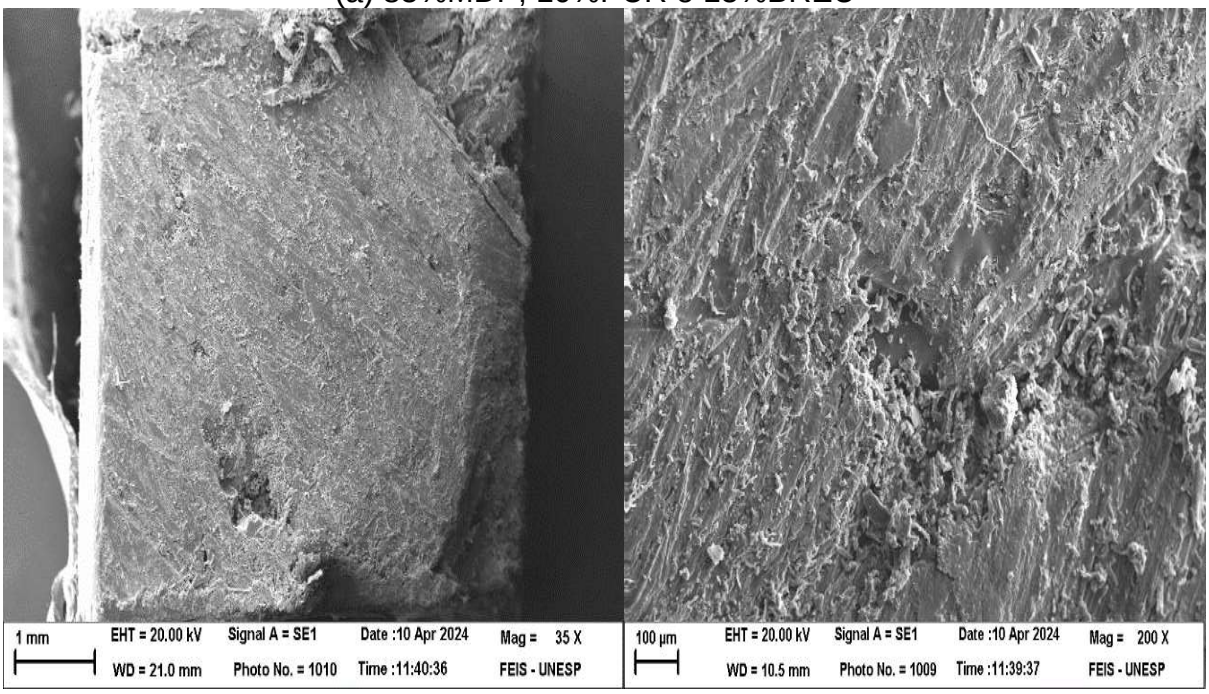
e a fusão parcial do PET, favorecendo uma distribuição mais homogênea dos componentes na matriz do painel e contribuindo para uma melhor coesão estrutural.

Nos ensaios físicos, verificou-se que a absorção de água foi superior ao inchamento em espessura, um fenômeno que pode estar relacionado a diferentes fatores. Primeiramente, as partículas provenientes de painéis pós-consumo apresentavam um teor de umidade reduzido, o que favoreceu a absorção de água. Além disso, os espaços residuais entre as partículas permitiram a infiltração da umidade sem, no entanto, causar um inchamento excessivo, uma vez que a interação eficiente entre adesivo e partículas restringiu a expansão dimensional dos painéis. Estudos prévios indicam que a presença de polímeros termoplásticos, como o PET, pode atuar como um agente estabilizador na estrutura dos painéis, reduzindo a expansão higroscópica e aumentando a resistência à degradação por umidade (IWAKIRI, 2005; WEBER; IWAKIRI, 2015; CAZELLA, 2022). Dessa forma, os resultados sugerem que a incorporação de PET pode ser uma alternativa viável para a melhoria da estabilidade dimensional dos painéis aglomerados, desde que sua proporção seja cuidadosamente controlada para evitar impactos negativos nas propriedades mecânicas do material.

Figura 48 - Imagens de MEV mistura com breu



(a) 85%MDP, 10%PUR e 15%BREU



(b) 70%MDP, 10%PUR e 30%BREU

Fonte: autora (2024)

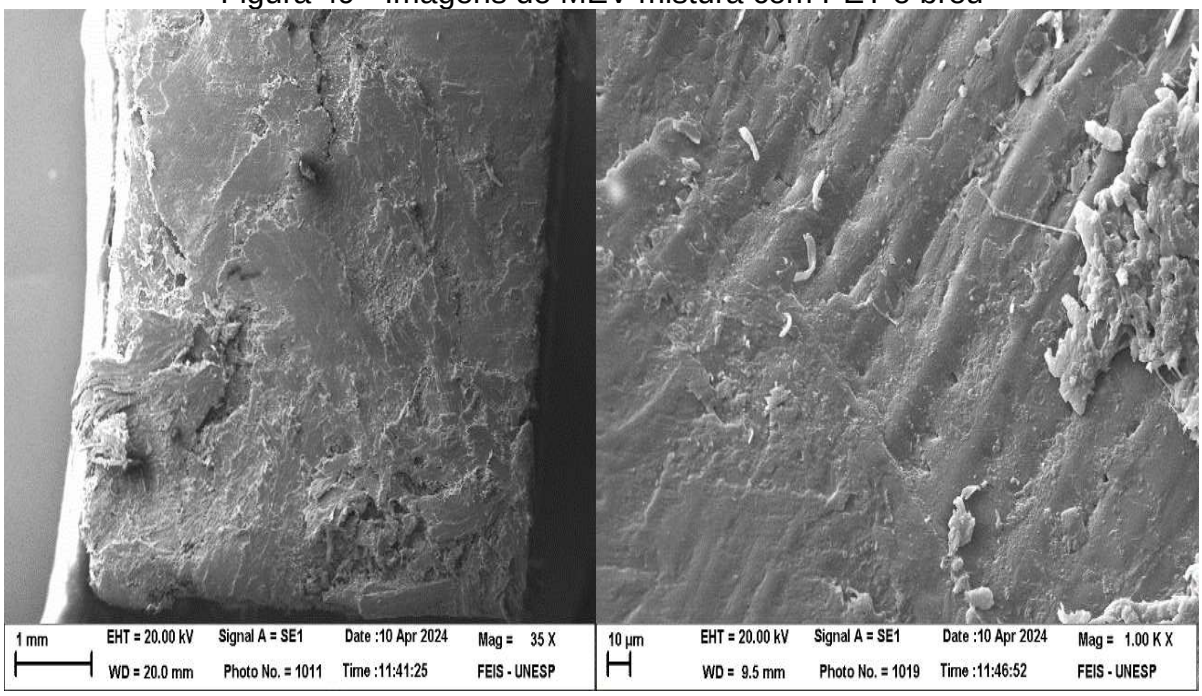
As micrografias das misturas contendo breu, especificamente 85/15BREU (Figura 48a) e 70/30BREU (Figura 48b), indicam que os painéis apresentaram uma estrutura relativamente uniforme, com uma redução na quantidade de vazios, especialmente na formulação com 30% de breu, que demonstrou uma boa coesão entre as partículas. No entanto, apesar dessa aparente homogeneidade, o aditivo não

foi eficaz na mitigação da absorção de água nem na contenção do inchamento das partículas, resultando em um desempenho inferior nos ensaios físicos.

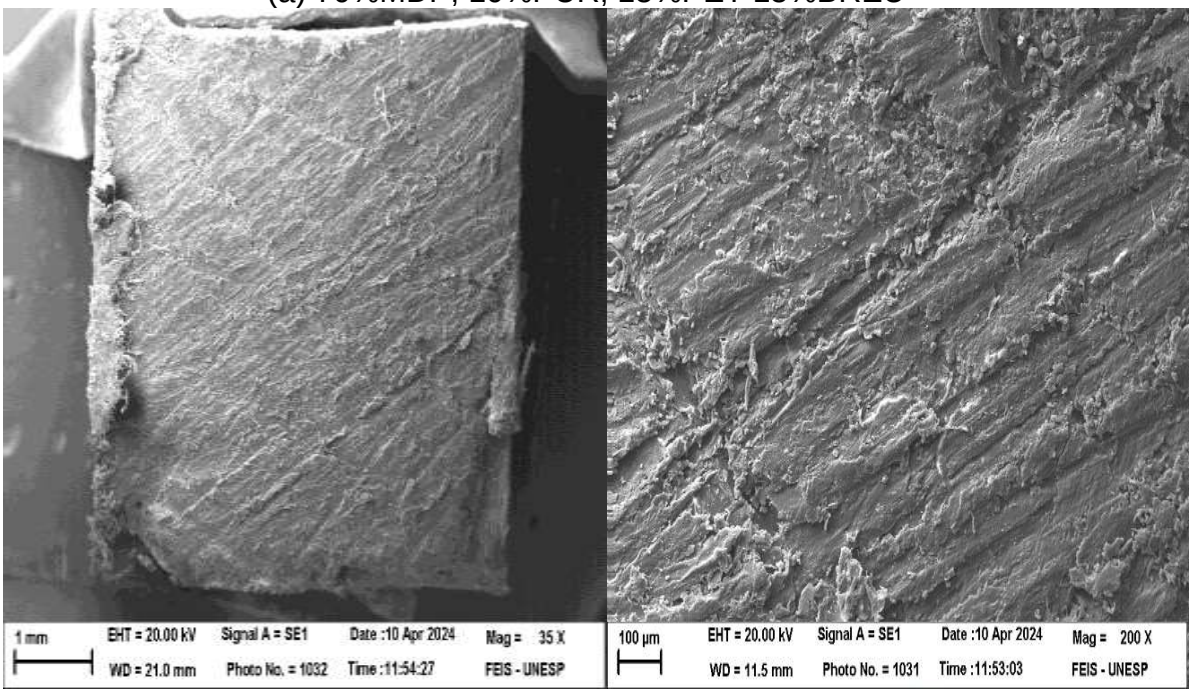
Esse comportamento pode estar associado à limitada interação entre o breu e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (PUR), o que comprometeu a capacidade de impermeabilização do painel. Estudos indicam que a eficiência de um aditivo na redução da higroscopicidade de painéis lignocelulósicos depende de sua compatibilidade química com o adesivo e da sua distribuição na matriz do material (IWAKIRI, 2005). Dessa forma, a inadequada interação entre o breu e o PUR pode ter contribuído para a manutenção da porosidade interna, permitindo a infiltração da umidade e resultando em valores elevados de inchamento e absorção de água.

Além disso, os painéis contendo breu também apresentaram desempenhos insatisfatórios nos ensaios de resistência à tração perpendicular, possivelmente devido à fraca adesão entre o breu e o adesivo PUR, o que pode ter comprometido a integridade das ligações internas do painel. Conforme discutido por Cazella (2022), a eficiência da ligação adesiva é crucial para garantir a resistência mecânica dos painéis, sendo que a presença de componentes que dificultem essa adesão pode resultar na perda dessa propriedade estrutural. Assim, os resultados sugerem que, embora o breu tenha contribuído para a uniformidade do painel, sua interação limitada com o adesivo comprometeu a resistência mecânica e a estabilidade dimensional do material, indicando que sua aplicação como aditivo em painéis aglomerados deve ser criteriosamente avaliada.

Figura 49 - Imagens de MEV mistura com PET e breu



(a) 70%MDP, 10%PUR, 15%PET 15%BREU



(b) 40%MDP, 10%PUR, 30%PET 30%BREU

Fonte: autora (2024)

As micrografias das misturas 70/15PET/15BREU (Figura 49a) e 40/30PET/30BREU (Figura 49b) indicam que esses painéis apresentaram uma estrutura coesa, com reduzida presença de vazios e eficiente aglutinação das partículas. A fusão do PET durante o processo de prensagem, devido à elevada temperatura, favoreceu a distribuição homogênea dos componentes, resultando em uma superfície uniforme, com aparência lisa e vitrificada, especialmente na

formulação 40/30PET/30BREU. Esse efeito pode ser atribuído à interação entre os aditivos, que atuaram na coesão das partículas e conferiram estabilidade ao painel.

Nos ensaios físicos, essas misturas apresentaram baixos valores de inchamento, o que sugere uma maior estabilidade dimensional, apesar de a absorção de água ter sido elevada, comportamento semelhante ao observado em outras formulações com PET. A capacidade do PET de atuar como um aglutinante e preencher os vazios estruturais pode ter contribuído para a restrição da expansão volumétrica dos painéis, minimizando os efeitos da umidade sobre a estrutura do material (CAZELLA, 2022; IWAKIRI, 2005).

Entretanto, os resultados mecânicos demonstraram que a adição de breu impactou negativamente a resistência dos painéis, possivelmente devido à sua tendência de vitrificação. Esse comportamento pode ter reduzido a flexibilidade e a capacidade de absorção de tensões internas, comprometendo a resistência à tração perpendicular e à flexão estática. Estudos indicam que aditivos que promovem a vitrificação podem afetar a coesão interna dos compósitos lignocelulósicos, reduzindo a eficiência da ligação entre partículas e adesivo e, consequentemente, diminuindo as propriedades mecânicas dos painéis (WEBER; IWAKIRI, 2015). Dessa forma, os resultados sugerem que, embora a combinação de PET e breu tenha favorecido a estabilidade dimensional dos painéis, a presença do breu em concentrações mais elevadas pode comprometer sua resistência estrutural, sendo necessária uma otimização na formulação para equilibrar esses efeitos.

6.5 CLASSIFICAÇÃO DE ACORDO COM A ABNT NBR 14810-2 (2018)

Para facilitar a análise comparativa dos resultados obtidos nos ensaios realizados com os painéis, apresenta-se a Tabela 20, a qual sintetiza as propriedades físicas e mecânicas de todas as formulações investigadas neste estudo. A disponibilização dessas informações em formato tabular permite uma avaliação mais detalhada e objetiva das variáveis analisadas, proporcionando um embasamento sólido para a discussão dos desempenhos relativos das diferentes composições de painéis. Ademais, a comparação sistemática dos dados experimentais facilita a identificação de tendências e correlações, contribuindo para o aprimoramento das formulações e para a validação das hipóteses propostas.

Tabela 20 – Resultado dos ensaios físicos e mecânicos dos painéis

Painel	I24h (%)	TP (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
MDP (pós-consumo)	16,29	0,89	14,83	2199
100MDP	13,51	1,18	26,06	3224
85MDP15PET	8,37	2,01	32,89	861
70MDP30PET	6,36	2,32	35,41	1184
85MDP15BREU	18,72	1,05	25,88	2922
70MDP30BREU	17,90	0,43	19,85	2298
70MDP15PET15BREU	13,51	1,52	23,58	1656
40MDP30PET30BREU	10,85	0,40	14,82	2224

Fonte: autora (2024)

A análise dos resultados demonstra um aumento significativo nas propriedades mecânicas dos painéis aglomerados, incluindo o módulo de ruptura (MOR), o módulo de elasticidade (MOE), e a resistência à tração perpendicular (TP), enquanto se observa uma redução na taxa de inchamento em espessura após 24 horas (I24h). Essa melhoria de desempenho é particularmente evidente nos painéis produzidos com adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (PUR), quando comparados aos painéis de origem. Além disso, verifica-se que a incorporação progressiva de PET nas misturas resultou em um aprimoramento adicional dessas propriedades, com exceção do MOE, que apresentou uma tendência de redução. Esse comportamento indica que a presença de partículas de polímero plástico, quando combinadas às partículas pós-consumo e ao adesivo PUR, promove um aumento da rigidez estrutural dos painéis, ao mesmo tempo em que reduz sua elasticidade, o que pode impactar sua aplicação em determinadas finalidades (IWAKIRI, 2005).

Embora partículas de menor granulometria geralmente resultem em um maior consumo de adesivo, conforme discutido por Iwakiri e Trianoski (2020), no presente estudo, a introdução do PET modificou essa dinâmica. Por não ser um material poroso como a madeira, o PET permitiu uma interação mais eficiente entre as partículas pós-consumo e o adesivo PUR, favorecendo um melhor envelopamento das partículas e a redução de vazios internos na matriz do painel. Essa maior coesão estrutural contribuiu para uma menor suscetibilidade ao inchamento, mesmo diante de um elevado índice de absorção de água, indicando que o PET pode atuar como um estabilizador dimensional na composição dos painéis.

A Tabela 21 apresenta os parâmetros de classificação estabelecidos pelas normas técnicas nacionais, permitindo uma comparação detalhada entre os resultados obtidos e os requisitos normativos para a caracterização dos painéis aglomerados.

Tabela 21 - Parâmetros físicos e mecânicos da ABNT NBR 14810-2 (2018)

ABNT NBR 14810-2 (2018)	Espessura (mm)	I24h máximo (%)	TP mínimo (MPa)	MOR mínimo (MPa)	MOE mínimo (MPa)	Painéis
P2	13 < E > 20	22	0,35	11	1600	**MDP (pós-consumo) 85MDP15BREU 70MDP30BREU 70MDP15PET15BREU**
P3		14	0,45	14	1950	**100MDP 40MDP30PET30BREU**
P4		15	0,35	15	2300	
P5		10	0,45	16	2400	
P6		16	0,50	18	3000	
P7		10	0,70	20	3100	

Fonte: autora (2024)

A classificação dos painéis obtidos a partir das misturas propostas foi conduzida com base nos valores máximos e mínimos estabelecidos pelas normativas vigentes para cada categoria de painel. Os critérios de avaliação consideraram tanto as propriedades físicas quanto as mecânicas dos materiais, garantindo que os painéis atendessem às exigências normativas para aplicações específicas.

Os painéis pós-consumo do tipo MDP, que serviram como matéria-prima para a obtenção das partículas pós-consumo, foram classificados como pertencentes à categoria P2, adequada para aplicações não estruturais, em ambientes internos e condições secas. Essa mesma classificação foi atribuída às formulações compostas por 85% MDP, 10% PUR e 15% breu; 70% MDP, 10% PUR e 30% breu; e 70% MDP, 10% PUR, 15% PET e 15% breu, uma vez que seus desempenhos atenderam aos requisitos normativos estabelecidos.

Entretanto, os painéis formulados com 85% MDP, 10% PUR e 15% PET, assim como aqueles contendo 70% MDP, 10% PUR e 30% PET, não puderam ser enquadrados dentro da classificação normativa. Isso ocorreu devido ao fato de que seus valores de módulo de elasticidade (MOE) não atingiram o limite mínimo exigido

de 1600 MPa, comprometendo sua adequação para as aplicações previstas na norma (IWAKIRI, 2005; WEBER; IWAKIRI, 2015).

Já os painéis obtidos a partir da formulação contendo 100% de partículas pós-consumo e 10% de adesivo poliuretano à base de óleo de mamona foram classificados como pertencentes à categoria P3, o que indica que possuem resistência compatível para aplicações em condições úmidas. Da mesma forma, os painéis formulados com 40% MDP, 10% PUR, 30% PET e 30% breu atenderam aos requisitos mínimos e máximos estabelecidos pela norma, garantindo sua classificação dentro dos critérios normativos para painéis aglomerados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nos ensaios, conduzidos com base na ABNT NBR 14810-2 (2018) para a determinação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis, validaram a viabilidade da produção de painéis aglomerados utilizando partículas pós-consumo em combinação com adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (PUR), aditivados com PET e breu. Esses materiais demonstraram potencial como alternativa sustentável à madeira convencional e aos adesivos sintéticos utilizados nos painéis.

Os aditivos empregados apresentaram comportamentos distintos. Enquanto o PET melhorou todas as propriedades dos painéis, exceto o módulo de elasticidade (MOE), o breu comprometeu as características hidrofóbicas e a resistência à tração. A comparação dos resultados experimentais com referências nacionais e internacionais confirmou que o adesivo PUR interagiu de forma eficiente com as partículas pós-consumo. Além disso, esse adesivo apresenta menor impacto ambiental e toxicidade reduzida, tornando-se uma alternativa promissora.

Conforme os critérios normativos, os painéis produzidos com 85% de partículas pós-consumo, 10% de adesivo PUR e 15% de PET, bem como aqueles compostos por 70% de partículas pós-consumo, 10% de PUR e 30% de breu, não atenderam aos requisitos mínimos para enquadramento na norma devido aos baixos valores de MOE, que não atingiram o limite mínimo especificado de 1600 MPa.

Por outro lado, tanto os painéis pós-consumo originais quanto aqueles contendo breu em diferentes proporções, além da formulação 70% pós-consumo, 10% PUR, 15% PET e 15% breu, foram classificados como P2, destinados a aplicações não estruturais em ambientes internos e secos. Já a formulação contendo 40% de partículas pós-consumo, 30% de PET e 30% de breu obteve um desempenho superior e foi classificada como P3, destinada a aplicações em ambientes úmidos. Adicionalmente, os painéis formulados com 100% de partículas pós-consumo e 10% de PUR também atingiram a classificação P3, demonstrando sua viabilidade para aplicações mais exigentes em termos de resistência à umidade.

Os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) forneceram informações detalhadas sobre a estrutura interna dos painéis. Os painéis pós-consumo apresentaram grande quantidade de vazios e baixa quantidade de adesivo, comprometendo o envelopamento das partículas e aumentando sua suscetibilidade à

água. Já os painéis compostos por 100% MDP e 10% de PUR demonstraram um envelopamento mais eficiente, resultando em maior proteção contra a umidade.

A incorporação de PET reduziu ainda mais a quantidade de vazios, promovendo uma matriz mais compacta, enquanto as formulações contendo breu apresentaram superfícies mais coesas. A combinação dos aditivos resultou em uma estrutura altamente homogênea, com mínima presença de vazios, especialmente nas misturas com maiores proporções de aditivos. Esses achados reforçam a importância da formulação dos painéis para a otimização de suas propriedades mecânicas e físicas.

Esta pesquisa contribui significativamente para o avanço dos estudos sobre a utilização de materiais alternativos na fabricação de painéis aglomerados, especialmente no contexto da economia circular e da valorização de resíduos pós-consumo. A incorporação de PET e breu como aditivos, associada ao uso de um adesivo de base biológica, oferece uma solução inovadora para a redução da dependência de madeira virgem e adesivos sintéticos de alto impacto ambiental. Os resultados obtidos reforçam a viabilidade técnica da utilização desses compósitos e fornecem subsídios para futuras pesquisas sobre o desenvolvimento de materiais sustentáveis para a indústria moveleira e da construção civil.

Apesar dos avanços apresentados, algumas limitações devem ser consideradas, como o desempenho mecânico, que embora os painéis com PET tenham demonstrado melhorias na resistência, o impacto na redução do módulo de elasticidade sugere a necessidade de ajustes na formulação para garantir um equilíbrio entre rigidez e flexibilidade. Interação entre breu e adesivo PUR, já que os resultados indicam que o breu pode prejudicar a adesão e resistência à tração, sugerindo que seu uso deve ser mais bem estudado para otimizar a compatibilidade química entre os componentes. E a escalabilidade industrial, porque os testes foram conduzidos em escala laboratorial, sendo necessária uma avaliação sobre a viabilidade técnica e econômica da produção desses painéis em larga escala.

Diante das descobertas desta pesquisa, algumas direções para estudos futuros podem ser exploradas a otimização das proporções de PET e breu para encontrar uma composição que maximize a resistência mecânica sem comprometer a flexibilidade dos painéis. Podem ser feitas investigações sobre tratamentos químicos ou físicos que possam melhorar a adesão entre o breu e o adesivo PUR, aumentando a resistência dos painéis. Uma análise do comportamento dos painéis em longo prazo,

considerando fatores como envelhecimento, resistência ao fogo e impacto ambiental ao longo do ciclo de vida do material. E a avaliação da viabilidade industrial, incluindo testes de produção em maior escala e análise econômica para determinar a competitividade desses materiais em relação aos painéis disponíveis no mercado.

Os resultados obtidos indicam que a substituição total da madeira pelas partículas pós-consumo combinadas com adesivo PUR e aditivos como PET e breu é uma estratégia viável para a produção de painéis aglomerados. Além de promover o uso sustentável de recursos e minimizar o impacto ambiental, essa abordagem está alinhada aos princípios da economia circular, contribuindo para o tripé do desenvolvimento sustentável (ODS), que abrange os aspectos ambientais, econômicos e sociais. O avanço nesta área pode impulsionar a criação de materiais de alto desempenho com menor impacto ambiental, consolidando novas possibilidades para a indústria moveleira e da construção civil.

REFERÊNCIAS

ABIMCI. Home page. ABIMCI. 2023. Disponível em: https://abimci.com.br. Acesso em: 19 janeiro 2024.

ABIMÓVEL. Capa. ABIMOVEL. 2023. Disponível em: http://abimovel.com. Acesso em: 19 janeiro 2024.

ABIPET - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDUSTRIA DO PET. Disponível em: https://www.abipet.org.br/. Acesso em: 3 março 2024.

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

AGREGADOS: DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA. ABNT NBR NM 248, 2003.

ALVES, L. R. *et al*. A utilização de óleos vegetais como fonte de polióis para a síntese de poliuretano: uma revisão. **Disciplinarum Scientia**, Santa Maria, v. 22, ed. 1, p. 98-118, 2021. DOI:10.37779/nt. v22i1.3711.

ARAÚJO, A. **Tendências no Design de Produto - Mobiliário Doméstico como Paradigma.** 2016. 140 f. Dissertação (Mestrado em Design de Equipamento) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.

ARAUJO, C. K. C.; DE CAMPOS, C. I.; CAMARGO, S. K. de C. A.; CAMARGO, B. S. **Caracterização mecânica de painéis particulados de média densidade produzidos a partir de resíduos de madeira**. **Revista Gestão Industrial**, v. 15, n. 1, 2019.

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 março 2024.

ASTARI, L.; SUDARMANTO; AKBAR, F. Characteristics of Particleboards Made from Agricultural Wastes. *Em*: IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE, 2019, **Anais**: Institute of Physics Publishing, 2019.

ATAR, I.; NEMLI, G.; AYRILMIS, N.; BAHAROĞLU, M.; SARI, B.; BARDAK, S. Effects of hardener type, urea usage and conditioning period on the quality properties of particleboard. **Materials and Design**, v. 56, p. 91–96, 2014.

ATLAS DO PLÁSTICO: **Fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos**. Rio de Janeiro: Fundação Heirich Böll, 2020. Disponível em: https://br.boell.org/sites/default/files/202011/Atlas%20do%20Pl%C3%A1stico%20%20vers%C3 %A3o%20digital%20%2030%20de%20novembro%20de%202020.pdf. Acesso em: 14 junho 2024.

AWAJA, F.; PAVEL, D. Recycling of PET**. European Polymer Journal**, Oxford, v. 41, n. 7, p.14531477, jul. 2005. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005.

AZEVEDO, E. C. **Síntese e Caracterização de Compósito Piezo elétrico Polímero Cerâmica 0-3.** 1999. Dissertação (Mestrado) – São Carlos, 1999

AZEVEDO, E. C. **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretana derivado do óleo de mamona**. 2009. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba 2009.

BAUMAN, Zygmunt. **Vida para Consumo: a transformação das pessoas em mercadoria.** Tradução de Carlos Alberto Medeiros. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2008.

BAUDRILLARD, J. **A sociedade de consumo.** Lisboa: Edições 70, 2005.

BISPO, R. A. **Produção e avaliação de painéis de partículas de fibra de coco, pínus e eucalipto aglutinadas com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona**. 2020. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira 2020.

BOTTINI L. M.; BATISTA, R. L. **O trabalho da mulher durante a revolução industrial inglesa (1780 a 1850)**. Os desafios da escola pública paranaense na perspectiva do professor PDE. v.1, 2013. Disponível em: http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/cadernospde/pdebusca/producoes_pde/2013/2013_fafipa_hist_artigo_lucia_mamus_bottini.pdf. Acesso em: 08 maio 2024.

BNDES - BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Painéis de madeira reconstituída**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: http://www.bndes.gov.br/. Acesso em: 17 novembro 2022.

BRANCO, A. A. **Para uma maior compatibilização entre móveis e usuários.** Revista Madeira/Móveis, v.1, n.1, p.18-26, 1983.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htmanalto.gov.br. Acesso em: 05 março 2024.

BRASIL. Lei Federal Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. **Dispõe sobre sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm. Acesso em: 11 março 2024.

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.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L.E.G. **Recursos químicos e energéticos florestais**. Piracicaba: ESALQ, 1978. 46 p.

CAETANO, Mário. **Breu**. Disponível em: https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/materias-primas/agentes-de-pegajosidade/tipos-agentes-de-pegajosidade/breu/. Acesso em: 10 julho 2024.

CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, LTC, Rio de Janeiro, 2020.

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.

CATTO, A.L. *et al*. **Influence of coupling agent in compatibility of post-consumer HDPE in thermoplastic composites reinforced with Eucalyptus fiber.** 2014. Mat. Res. 17, 203–209. https://doi.org/10.1590/ S1516-14392014005000036.

CAZELLA, P. H. da S. **Avaliação de painéis aglomerados homogêneos de pinus com incorporação de partículas de pet aglutinados com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona**. 2022. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira 2022.

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

CETIN, N. S.; OZMEN, N. U. Use of organosolv lignin in phenol-formaldehyde resins for particleboard production I. Organosolv lignin modified resins. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, v. 22, p. 477–480, 2002. Disponível em: Acesso em: 11 julho 2024.

CHIPANSKI, E. R. **Proposição para melhoria do desempenho ambiental da indústria de aglomerado no Brasil.** 2006. 193 f. Dissertação (Mestrado) - 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**. [S. l.]: MDPI - FORESTS, 2022. DOI https://doi.org/10.3390/f13030427.

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., SARTORI, D. L., MÁRMOL, G., SCHMIDT, G. M., BALIEIRO, J. C. C., FIORELLI, J. 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.

CUNHA, Henrique Andrade Gontijo. **Produção de chapas de aglomerado a partir do bagaço de cana-de-açúcar prensado usando cola a base de fécula de mandioca, arroz e breu: Um caso de design do material**. 2019.

DE SOUZA, M. V.; DA SILVA, S. A. M. da; CAZELLA, P. H. da S.; RODRIGUES, F. R.; CARNEIRO, T. E. B.; PINTO, E. M.; MARTINS, A. R.; AOUADA, M. R. de M.; CHRISTOFORO, A. L. Painéis aglomerados com resíduo de Pinus caribaea var. caribaea com adesivo bicomponente sustentável. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 3, p. 263–276, 2023.

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

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada**. 2005. - 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.

DUARTE, Fábio. **Arquitetura e tecnologias de informação: da revolução industrial à revolução digital.** Annablume, 1999.

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

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Contexto e Tendências do Mercado da Madeira.** Brasil, 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/64342135/contexto-e-tendencias-do-mercado-da-madeira. Acesso: 14 março 2024.

ESTOQUE, R. C.; JOHNSON, B. A.; DASGUPTA, R.; GAO, Y.; MATSUURA, T.; TOMA, T.; HIRATA, Y.; LASCO, R. D. Rethinking forest monitoring for more meaningful global forest landscape change assessments. **Journal of Environmental Management**, v. 317, 2022.

FAO. 2022. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO/visualize. Acesso em: 4 abril 2024.

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** [...] [S. l.: s. n.], 2019.

FERREIRA DE ALMEIDA, N.; AKIRA MORI, F.; LOPES GOULART, S.; MARIN MENDES, L. Study of reactivity of tannins of leaves and barksof Barbatimão Stryphnodendron adstringens (Mart.) Coville. **Scientia Forestalis**, Piracicabav. 38, p. 401–408, 2010.

FERREIRA, J. P. R. J. **Análise da cadeia produtiva e estrutura de custos do setor brasileiro de produtos resinosos.** 105 f. Dissertação (Economia Aplicada) Escola Superior de Agricultura “Luís de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2001.

FIORELLI, J. *et al*. **Desenvolvimento e caracterização de painéis de partículas com casca de amendoim e resina poliuretana de mamona**. In: LAHR, F. A. R.; CHRISTOF ORO, 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.

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. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1583.

GACHTER, R.; MULLER, G. **Plásticos: materiais de termoformação, processamento e caracterização**. 2. ed. [S. l.: s. n.], 2013.

GARRIDO, M. A. de O.; POZ, R. dal; FREITAS, J. A.; ROCHA, F.T.; GURGEL GARRIDO, L. M. do A. **Resinagem: Manual Técnico**. Instituto Florestal. Secretaria do Meio Ambiente. São Paulo,1998. 23p.

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

GOMES, Daniela Vasconcellos**. Educação para o consumo ético e sustentável.** Revista Eletrônica Mestrado em Educação Ambiental, v.16, p. 18-31, 2006 - semestral. ISSN 1517-1256.

GUPTA, M.; MADHUKESHWARA, N.; ROHATGI, P. K. **Properties and potentialities of natural fiber composites in civil construction.** [S. l.]: Edit Woodhead, 2015. 44 p.

GRÃOS DE PEDREGULHO RETIDOS NA PENEIRA DE ABERTURA 4, 8 mm — **Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. ABNT NBR 6458. 2016.

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

HERRADON, M. P. **Resíduos de movelaria com polietileno tereftalato para produção de painéis aglomerados aglutinados com poliuretano derivado de mamona**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira, 2023.

HOBSBAWM, E. J. **A revolução industrial.** In: HOBSBAWM, E. J. A era das revoluções: 1789 - 1848. São Paulo: Paz e Terra, 2015.

HOMA, M. **Considerações técnicas e potencialidade da produção de derivados de resina de Pinus.** Silvicultura, v.8, n.33, p. 61-66, 1983.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável, Brasil 2015**. Rio de Janeiro: Estudos e Pesquisas Informação Geográfica, n. 10. 2015.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório Anual 2022**. Disponível em: https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf. Acesso em: 12 abril 2024.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório Anual 2023.** Disponível em:https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf. Acesso em: 21 abril 2024.

IMARC. 2022. Disponível em: https://www.imarcgroup.com/particle-board-market. Acesso em: 4 abril 2023.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos.** Brasília: Ipea, 2022. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos. Acesso em: 10 março 2024.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba, 2005.

IWAKIRI, S.; ZELLER, F.; PINTO, J. A.; GUADALUPE, M.; RAMIREZ, L.; SOUZA, M. M.; SEIXAS, R. Avaliação do potencial de utilização da madeira de Schizolobium amazonicum “Paricá” e Cecropia hololeuca “Embaúba” para produção de painéis aglomerados. **Acta Amazonia**, v. 40, n. 2, p. 303–308, 2010.

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

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

KELLY, M. W. A. **Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboards**. Estados Unidos: Prod. Lab. General Technical Report FPL-10, 1977. 1977.

LEÃO, Maurício de Souza; NAVEIRO, Ricardo Manfredi. **Fatores de competitividade da indústria de móveis de madeira do Brasil**. REMADE - Revista da Madeira. Edição n° 119. 2009. Disponível em:

http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1375&subject=M Acessado em: 10 abril 2024.

LEE, S. H.; LUM, W. C.; BOON, J. G.; KRISTAK, L.; ANTOV, P.; PEDZIK, M.; ROGOZINSKI, T.; TAGHIYARI, H. R.; LUBIS, M. A. R.; FATRIASARI, W.; YADAV, S. M.; CHOTIKHUN, A.; PIZZI, A. **Particleboard from agricultural biomass and recycled wood waste: a review**. Elsevier Editora Ltda, 2022.

LEMOS, Nayara Dias. **Panorama da gestão da qualidade no setor florestal da região Sudeste.** 2023. 41 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2023.

LIMA, O. S. **Goma Resina: Origem, desenvolvimento e perspectivas para o Brasil**. ARESB. São Paulo. 1996. 34-40p.

LIU, J.; MA, X.; ZHANG, Y. Preparation and characterization of a formaldehyde-free soy-based adhesive for plywood**. Polymers,** Basel, 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.

LOURENÇON, T. V.; BOLZON DE MUNIZ, G. I.; MAGALHÃES, Washington LE. **Lignina kraft e breu como adesivo de madeira**. 2016.

MACIEL, A. da S. **Chapas de partículas aglomeradas de madeira de Pinus elliottii ou Eucalyptus grandis, em mistura com poliestireno e polietileno tereftalato**. 2001. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa 2001.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. São Francisco: Miller Freeman, 1993. 1993.v. 2.

MALONEY, T.M. **Modern particleboard & dry process fiber board manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman Publications, 1977. 672 p.

MARAVEAS, C. **Production of sustainable construction materials using agro-wastes**. MDPI AG, 2020.

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) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2014.

MATTOS, L. R. G.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B. das. **Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas**. [*S. l.: s. n.*], 2008. Disponível em: http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital. Acesso: 30 junho 2024

MATUCHEVSKI Balzan, K., BRUM, A., TRENNPOHL, D., & KOHLER, R. (2020). **Aspectos da cadeia produtiva moveleira do Brasil e o Rio Grande do Sul nesse contexto.** Revista Perspectiva, 44(166), 7-18. https://doi.org/10.31512/persp.v.44.n.166.2020.95.p.7-18

MEIRELES, Andréa Cecília Lima Varicelli**. Influência do conhecimento do consumidor sobre questões ambientais, no processo de tomada de decisão relativo ao descarte de móveis.** 2018.

MENDES, R. F. **Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades de painéis OSB**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba 2010. Disponível em: Acesso em: 4 abril 2024.

MENDES, L. M.; ALBUQUERQUE, C. E. C. de; IWAKIRI, S. **A indústria brasileira de painéis de madeira**. 2003. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=331. Acesso em: 4 abril 2024.

MINILLO, L. Q. **Aproveitamento de resíduo das indústrias de celulose e sucroalcoleira para produção de painéis aglomerados.** 2016. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, SP, 2016.

MORETTO, Bianca F. *et al*. **Estudo do uso da fibra do coco como isolante termoacústico.** INOVAE - Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation (ISSN 2357-7797), v. 8, n. 1, p. 95-116, 2020.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard**. London: Southern Illinois University Press, 1974. 1974.v. 2.

NASCIMENTO, M. F. do; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. **Painéis de partículas de média densidade: Fabricação e caracterização. Série didática "Produtos derivados da madeira"**. São Carlos. 2015.

NAVAL STORE REVIEW. 2000. **Anais**. do PCA (Pine Chemicals Association) International Conference. Washington, D.C. in Loews L' Enfant Plaza Hotel, p. 5-9, out. 2000.

NEVES, Generci Assis *et al*. **Análise econômico-financeira da exploração de Pinus resinífero em pequenos módulos rurais**. Monografia (Especialização em Agribusiness) Universidade de São Paulo, Sorocaba, Brasil, 2001.

NISTICO, R. **Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. Polym.** 2020. Test. 90, 106707 https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106707.

NOCE, R.; DE OLIVEIRA, J. M.; CARVALHO, R. M. M. A.; DA SILVA, M. L.; DE REZENDE, J. L. P.; MENDES, L. M.; DA C. G. BARBOSA, T. R. **Análise de tendência do mercado internacional de aglomerado**. n. 2, p. 245–250, 2008.

OLIVEIRA, Y. M. M. de; OLIVEIRA, E. B. de (Ed.). **Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental.** Brasília, DF: Embrapa, Cap. 1, 2017.

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

PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE MÉDIA DENSIDADE - PARTE 1: TERMINOLOGIA. **ABNT NBR 14810-1**. 2013. Disponível em: www.abnt.org.br.

PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE MÉDIA DENSIDADE PARTE 2: REQUISITOS E MÉTODOS DE ENSAIO. **ABNT NBR 14810-2**. 2018. Disponível em: www.abnt.org.br.

PAPADOPOULOU, E.; BIKIARIS, D.; CHRYSAFIS, K.; WLADYKA-PRZYBYLAK, M.; WESOLEK, D.; MANKOWSKI, J.; KOLODZIEJ, J.; BARANIECKI, P.; BUJNOWICZ, K.; GRONBERG, V. Value-added industrial products from bast fiber crops. **Industrial Crops and Products**, v. 68, p. 116–125, 2015.

PĘDZIK, M.; JANISZEWSKA, D.; ROGOZIŃSKI, T. **Alternative lignocellulosic raw materials in particleboard production: A review**. Elsevier B.V., 2021.

PIMENTA, Renata Lucia de Abreu**. O processo de tomada de decisão dos consumidores de móveis residenciais de decoração em Belo Horizonte.** Pedro Leopoldo: Faculdades Integradas de Pedro Leopoldo, 2011.

PIZZI, A.; MITTAL, H. L. **Handbook of Adhesive Technology Third Edition**. Third Editioned. 2017.

PRIOLI, Amanda de A.; DE CAMPOS PALMA, Julia; DE MORAES, Viviane Tavares. **AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS PÓS-CONSUMO DA INDÚSTRIA MOVELEIRA**. 2018.

PROJETO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA. **ABNT NBR 7190**. 1997. Disponível em: www.abnt.org.br.

PROTÁSIO, T. de P.; FARINASSI MENDES, R.; VANOLI SCATOLINO, M.; MARIN MENDES, L.; FERNANDO TRUGILHO, P.; CRISTINA NOGUEIRA ALVES DE MELO, I. **Scientia Forestalis Thermal stability of particleboards of sugar cane bagasse and Pinus spp. Wood**. 2015.

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.

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**, Tokyo, p. 279-286, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s10086-018-1702-3.

REMADE - REVISTA DA MADEIRA. **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=RM_Digital&title=Revista%20da%20Madeira%20Digital. Acesso em: 7 janeiro 2027.

ROCHA, B. B. **Aproveitamento de resíduos de madeira e bagaço de cana-de-açúcar na produção e avaliação de painéis aglomerados**. 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2016.

RODRIGUES, F. M. S. **Desenvolvimento de Ligandos e Processos para Reações de Hidrogenação: Otimização da Reação Hidrogenação da Colofónia**. Dissertação de Mestrado. 2015.

RODRIGUES, F. R.; BISPO, R. A.; CAZELL, P. H.; SILVA, M. J.; CHRISTOFORO, A. L.; SILVA, S. A. M. Particleboard Composite Made from Pinus and Eucalyptus Residues and Polystyrene Waste Partially Replacing the Castor Oil-Based Polyurethane as Binder. **Materials Research**, v. 26, n. suppl 1, 2023.

RODRÍGUEZ, Víctor A. Z; MEZONES, Carlos E. G; ALVAREZ, Cristian X. C**. A análise da colaboração dos usuários com descarte responsável de móveis usados.** Trabalhos Científicos, v. 9. 2018.

ROQUE, C. A. L.; VALENÇA, A. C. de V. **Painéis de madeira aglomerada**. 1998. Disponível em: http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital.

SALVADOR, V. T. **Estudo de reações de hidratação de pinenos utilizando resinas de troca iônica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2019.

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

SILVA, S. A. M. da. **Confecção e avaliação de painéis de partículas de madeira de média densidade com aproveitamento de resíduos industriais**. 2016. Tese (Livre-Docência em Produtos Engenheirados da Madeira) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira 2016.

SINDIPLAST - SINDICATO DA INDÚSTRIA DE MATERIAS PLÁSTICOS. Transformação e Reciclagem de Material Plástico do Estado de São Paulo. **Os Plásticos**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: http://www.sindiplast.org.br/osplasticos/. Acesso em: 23 junho 2024

SNIF. 2020. Disponível em: https://snif.florestal.gov.br/pt-br/cadeia-produtiva. Acesso em: 30 março 2024.

SOFO. 2022. Disponível em: https://www.fao.org/3/cb9360en/online/src/html/deforestation-land-degradation.html. Acesso em: 30 março 2024.

SOLOMON, Michael R. **O comportamento do consumidor: Comprando, possuindo e sendo.** Porto Alegre: Bookman, 2002.

SOLOS — PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO, caracterização e determinação do teor de umidade. **ABNT NBR 6457**. 2024.

SOLT, P.; KONNERTH, J.; GINDL-ALTMUTTER, W.; KANTNER, W.; MOSER, J.; MITTER, R.; VAN HERWIJNEN, H. W. G. Technological performance of formaldehyde-free adhesive alternatives for particleboard industry. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 94, p. 99–131, 2019. Disponível em: Acesso em: 4 abril 2024.

SOUZA, M. V. de. **Avaliação e viabilidade técnica para aproveitamento de resíduo de serraria de quatro espécies de madeira para produção de painéis aglomerados homogêneos e heterogêneos**. 2022. Dissertação (mestrado) -

Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira 2022.

SPIER, Gustavo Bauer. **Influência da incorporação do breu em polietileno de baixa densidade pós-industrial reforçado com fibra de pinus**. 2024.

SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005.

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**. General Technical Report FPL-GTR-282. Madison. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021. 543 p.

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 f. 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,** Raleigh, p. 5162-5170, 2019. DOI: 10.15376/biores.1 4.3.5162-5170.

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

TEIXEIRA, M. F. H. B. I. **Espectroscopia no infravermelho próximo associada à modelagem empírica multivariada para previsão da resistência a tração do poli (tereftalato de etileno) PET reciclado.** 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS REPORT. **United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division**. 2022. Disponível em: https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/Goal-15/. Acesso em: 22 março 2024.

THOEMEN, Heiko. **Wood-based Panels - An Introduction for Specialists**. Brunel University Press, 2010. 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, 2021.

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

VALENÇA, Antônio Carlos de Vasconcelos; PAMPLONA, Leonardo de Moura Perdigão; SOUTO, Sabrina Weber. **Os novos desafios para a indústria moveleira no Brasil.** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.15, p. [83] - 95, mar. 2002.

WADE, C. M.; AUSTIN, K. G.; CAJKA, J.; LAPIDUS, D.; EVERETT, K. H.; GALPERIN, D.; MAYNARD, R.; SOBEL, A. What is threatening forests in protected areas? A global assessment of deforestation in protected areas, 2001-2018. **Forests**, v. 11, n. 5, 2020.

WEBER, Cristiane; IWAKIRI, Setsuo. Utilização de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados. **Ciência Florestal**, v. 25, p. 405-413, 2015.

WWF-BRASIL. FUNDO MUNDIAL PARA A NATUREZA. **Relatório Anual.** [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: https://www.wwf.org.br/informacoes/bliblioteca/relatorioanual/. Acesso em: 19 maio 2024.

ZAMARIAN, E. H. C. *et al*. PRODUCTION OF PARTICLEBOARD FROM DISCARDED FURNITURE. **REVISTA ARVORE**, v. 41, n. 4, 2017.

ZANIN, Maria; MANCINI, Sandro Donnini. **Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia**. Editora UFSCar, 2022.

ZAU, M. D. L.; DE VASCONCELOS, R. P.; GIACON, V. M.; LAHR, F. A. R. Chemical, physical and mechanical properties of particleboard produced with Amazon wood waste - Cumaru (Dipteryx odorata) - and Castor oil based polyurethane adhesive. **Polímeros**, v. 24, n. 6, p. 726–732, 2014.

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.