

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

FRANCIELI ARALDI DE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DE PAINÉIS AGLOMERADOS PRODUZIDOS COM PARTÍCULAS
DE *PINUS* ssp. E AGLUTINADOS COM PET RECICLADO E BREU COLOFÔNIA**



Ilha Solteira - SP
2025

FRANCIELI ARALDI DE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DE PAINÉIS AGLOMERADOS PRODUZIDOS COM PARTÍCULAS
DE *PINUS ssp.* E AGLUTINADOS COM PET RECICLADO E BREU COLOFÔNIA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia de Construção Civil

Orientador(a): Prof. Dr. Sergio Augusto Mello da Silva

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C331a Carvalho, Francieli Araldi de.
Avaliação de painéis aglomerados produzidos com partículas de pinus ssp. e aglutinados com pet reciclado e breu colofônia / Francieli Araldi de Carvalho. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
77 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Engenharia de Construção Civil, 2025

Orientador: Sergio Augusto Mello da Silva

Inclui bibliografia

1. Caracterização de painéis particulados. 2. Resina de pinus. 3. Resíduos reciclados.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Essa pesquisa contribui diretamente com o 12º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU), que visa o consumo e produção sustentáveis. Através do desenvolvimento de painéis aglomerados utilizando partículas de Pinus, Politereftalato de Etileno (PET) reciclado e Breu Colofônia, buscou-se maximizar o aproveitamento de recursos florestais madeireiros e não madeireiros e reaproveitar um dos principais resíduos plásticos gerados pela sociedade. Até 2030 a ONU pretende alcançar uma gestão sustentável das florestas, utilizar os recursos naturais de forma eficiente e reduzir substancialmente a geração de resíduos plásticos por meio da reciclagem. Para atingir esses objetivos é imprescindível que novos produtos, que atendam a essas demandas sustentáveis, sejam propostos e desenvolvidos, a fim de serem gradualmente incorporados à sociedade.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research directly contributes to the 12th Sustainable Development Goal established by the United Nations (UN), which aims to achieve sustainable consumption and production. By developing particleboards using Pine particles, recycled Polyethylene Terephthalate (PET) and Colophony (Rosin), this study aims to maximize the use of wood and non-wood forest resources and reuse one of the main plastic wastes generated by society. By 2030, the UN aims to achieve sustainable forest management, efficient use of natural resources and reduce the generation of plastic waste through recycling. To achieve these objectives, it is essential to propose and develop new products that meet these sustainable demands, to be gradually incorporated into society.


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: AVALIAÇÃO DE PAINÉIS AGLOMERADOS PRODUZIDOS COM PARTÍCULAS DE PINUS ssp. E AGLUTINADOS COM PET RECICLADO E BREU COLOFÔNIA


AUTORA: FRANCIELI ARALDI DE CARVALHO

ORIENTADOR: SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA


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

Documento assinado digitalmente
 **SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA**
Data: 27/02/2025 12:31:16-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE LUIS CHRISTOFORO**
Data: 27/02/2025 12:33:50-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente
 **DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA**
Data: 27/02/2025 12:40:38-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de Rondônia - UNIR

Ilha Solteira, 27 de fevereiro de 2025

Dedico este trabalho a Deus e aos meus pais, João e Lucimara.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por minha existência, minha saúde e por me permitir lutar nas dificuldades e desfrutar das oportunidades dessa vida.

Ao meu grandioso pai, João, e minha preciosa mãe, Lucimara, por me amarem, incentivaram meus estudos e suavizarem todas as dificuldades que encontrei em minha trajetória.

A minha irmã Gabrieli, com quem aprendo muito desde criança, obrigada por estar presente em todas as etapas de minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio Augusto de Mello da Silva, por sua generosidade, proatividade, por compartilhar seu conhecimento e por expressar seu cuidado paternal com cada um de seus orientados.

A todos os amigos e familiares que me auxiliaram – direta ou indiretamente – e foram essenciais no desenvolvimento deste trabalho, especialmente: Felipe, Lucas, Denise, Rodrigo, Matheus, Marjorie e Antonio.

Aos professores da pós-graduação da FEIS – UNESP, pelo conhecimento compartilhado durante o mestrado. Aos técnicos do laboratório, pelo auxílio na confecção e ensaio dos painéis e a todos os funcionários que colaboraram na execução deste trabalho.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), à Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil – DEC e ao grupo de pesquisa Materiais Alternativos de Construção – MAC.

À Universidade Virtual do Estado de São Paulo (Univesp), pelo auxílio financeiro, aprendizado e experiência adquirida, decorrentes da atuação no programa de facilitadores.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES): o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Amarás ao Senhor teu Deus de todo o teu coração, e de toda a tua alma, e de todas as tuas forças, e de todo o teu entendimento, e ao teu próximo como a ti mesmo.” (Lucas, 10-27).

RESUMO

Existem dois grandes desafios inerentes à busca pelo desenvolvimento sustentável: o melhor aproveitamento dos recursos explorados e a correta gestão dos resíduos gerados pela sociedade. Buscando melhorar o aproveitamento de produtos florestais madeireiros e não madeireiros, este trabalho avaliou a produção de painéis aglomerados constituídos de dois importantes materiais extraídos das espécies do gênero *Pinus*: a madeira e a resina de Breu Colofônia. Além desses subprodutos, a pesquisa incorporou o Politereftalato de Etileno (PET) aos compósitos, apresentando uma possibilidade de destinação correta a este resíduo plástico. Para a produção dos painéis, foram propostas quatro misturas, compreendendo diferentes proporções de *Pinus* e PET: 100/0, 75/25, 50/50 e 25/75. Todos os painéis foram produzidos com 20% de resina de Breu Colofônia, pressão de 5 MPa, temperatura de 160°C e tempo total de prensagem de 10 minutos. Os painéis foram submetidos aos ensaios físicos de densidade, teor de umidade, inchamento e absorção de água após 24 horas, sendo as propriedades avaliadas segundo os requisitos normativos da ABNT NBR 14810-2/2018. Por meio da análise dos resultados, verificou-se a melhoria no desempenho físico dos painéis à medida em que o PET foi incorporado. Os painéis das misturas M3 (50% de *Pinus*, 50% de PET) e M4 (25% de *Pinus*, 75% de PET) atenderam aos requisitos mínimos exigidos pela normativa brasileira para as propriedades físicas, com destaque para a mistura M4, cujo inchamento em espessura obtido após 24 horas de imersão em água foi de 6,42%.

Palavras-chave: caracterização de painéis particulados; resina de *Pinus*; resíduos reciclados.

ABSTRACT

There are two major challenges inherent to achieving sustainable development: the best use of exploited resources and the correct management of waste generated by society. Aiming to improve the utilization of forest products, both timber and non-timber, this study evaluated the production of particleboard composed of two important materials extracted from Pinus species: wood and rosin (colophony). Furthermore, this research incorporated Polyethylene Terephthalate (PET) into the composites, providing a potential solution for the environmentally responsible disposal of this plastic waste. Four distinct mixtures were proposed for panel production, comprising varying proportions of Pinus and PET: 100/0, 75/25, 50/50, and 25/75. The manufacturing process involved the use of 20% pine rosin colophony, a pressure of 5 MPa, a temperature of 160°C, and a total pressing time of 10 minutes. The panels underwent physical testing for density, moisture content, swelling, and water absorption after 24 hours, in accordance with the normative requirements outlined in ABNT NBR 14810-2/2018. The results showed an enhancement in the physical performance of the panels as PET was incorporated. Notably, the panels from mixtures M3 (50% Pinus, 50% PET) and M4 (25% Pinus, 75% PET) satisfied the minimum requirements stipulated by the Brazilian standard for physical properties, with mixture M4 exhibiting a thickness swelling of 6.42% after 24 hours of water immersion.

Keywords: characterization of particleboard; pine resin; recycled waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção mundial de painéis aglomerados (1995-2021)	19
Figura 2 – Produção de painéis aglomerados no Brasil (1995-2021).....	19
Figura 3– Painéis particulados	20
Figura 4 – Técnica de resinagem a partir de árvores vivas.....	32
Figura 5 – Estrutura molecular do ácido abiético	34
Figura 6 – Aplicações do Breu Colofônia	35
Figura 7 – Composição dos RSU descartados no Brasil em 2019.....	36
Figura 8 – Aplicações do PET reciclado.....	38
Figura 9 – Processamento das tábuas.....	40
Figura 10 – Secagem das maravalhas ao ar livre	41
Figura 11 – Redução das maravalhas.....	41
Figura 12 – PET triturado	42
Figura 13 – Moagem do Breu Colofônia.....	43
Figura 14 – Agitador de peneiras	46
Figura 15 – Agitador de peneiras para o ensaio de composição granulométrica	47
Figura 16 – Balança térmica para determinadora de umidade.....	48
Figura 17 – Homogeneização da mistura.....	49
Figura 18 – Formadora do colchão de partículas	49
Figura 19 – Prensagem do painel	50
Figura 20 – Aspecto final dos painéis produzidos	51
Figura 21 – Corte dos painéis	52
Figura 22 – Aferição das dimensões dos corpos de prova.....	52
Figura 23 – Balança digital.....	53
Figura 24 – Secagem dos corpos de prova em estufa.....	54
Figura 25 – Acomodação dos corpos de prova para realizar a submersão	55
Figura 26 – Preparação do corpo de prova para a realização do MEV	57
Figura 27– Equipamento ZEISS (modelo LS15)	57
Figura 28 – Corpos de prova antes e após 24 horas de submersão em água	63
Figura 29 – MEV da região seccionada (500x)	65
Figura 30 – MEV da região seccionada (5000x)	65
Figura 31 – MEV da superfície intacta (1000x)	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos para propriedades de painéis com espessura > 4 a 6 mm	22
Tabela 2 – Propriedades do <i>Pinus taeda L</i>	29
Tabela 3 – Propriedades do Breu Colofônia	34
Tabela 4 – Propriedades do PET	37
Tabela 5 – Proporção dos materiais em cada mistura	44
Tabela 6 – Quantidade de material utilizado na produção de painéis	45
Tabela 7 – Composição granulométrica do <i>Pinus</i>	59
Tabela 8 – Composição granulométrica do PET	60
Tabela 9 – Densidade média dos painéis	61
Tabela 10 – Teor de umidade dos painéis	61
Tabela 11 – Inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água	62
Tabela 12 – Absorção após 24 horas.....	63
Tabela 13 – Análise estatística das propriedades físicas dos painéis fabricados com 20% de resina de Breu Colofônia.....	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1	PAINÉIS DE MADEIRA AGLOMERADA.....	18
3.1.1	Histórico mundial e no Brasil.....	18
3.1.2	Definições	19
3.1.3	Vantagens e aplicações	21
3.1.4	Classificações.....	21
3.1.5	Processo de fabricação de aglomerados	23
3.1.6	Fatores que influenciam no desempenho final dos painéis	24
3.1.6.1	Densidade	24
3.1.6.2	Teor de umidade	25
3.1.6.3	Geometria das partículas	25
3.1.6.4	Acidez	26
3.1.6.5	Teor de extrativos	26
3.1.6.6	Resina	26
3.1.6.7	Condições de prensagem: tempo, temperatura e pressão	26
3.2	MADEIRAS.....	27
3.2.1	Situação florestal no Brasil e no mundo	28
3.2.2	Madeira de Pinus	28
3.3	ADESIVOS	30
3.3.1	Definições, classificações e aspectos gerais	30
3.3.2	Resina de <i>Pinus</i>.....	31
3.4	POLÍMEROS PLÁSTICOS	35

3.4.1	Definições e aspectos gerais	35
3.4.2	PET	37
3.4.3	Aplicação do PET em painéis de madeira	38
4	materiais e métodos	40
4.1	MATERIAIS	40
4.1.1	<i>Pinus ssp</i>	40
4.1.2	Politereftalato de Etileno - PET	42
4.1.3	Resina de Pinus – Breu Colofônia	42
4.2	METODOLOGIA	43
4.2.1	Composição das misturas	43
4.2.2	Determinação da quantidade de material em cada mistura	44
4.2.3	Separação dimensional das partículas de Pinus	45
4.2.4	Análise da composição granulométrica das partículas	46
4.2.5	Determinação do teor de umidade das partículas	47
4.2.6	Produção dos painéis	48
4.2.7	Extração dos corpos de prova	51
4.2.8	Ensaaios físicos	52
4.2.8.1	Densidade	52
4.2.8.2	Teor de umidade	54
4.2.8.3	Inchamento em espessura após 24 horas	55
4.2.8.4	Absorção após 24 horas	56
4.2.9	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	56
4.2.10	Análise estatística	58
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	59
5.2	ENSAIOS FÍSICOS	60
5.2.1	Densidade	60

5.2.2	Teor de umidade.....	61
5.2.3	Inchamento em espessura e absorção após 24h	62
5.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	64
5.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	67
6	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS.....	70
	DADOS CURRICULARES.....	75

1 INTRODUÇÃO

Na década de 1960 já existiam indústrias de painéis aglomerados no Brasil que atendiam principalmente o setor moveleiro. No entanto, mesmo com a quantidade significativa de florestas existente em território nacional, nessa época não havia uma política ambiental rigorosa em relação à exploração da madeira. Em decorrência disso, o setor de aglomerados do país permaneceu estagnado durante 20 anos, entre as décadas de 1960 e 1980. (Roque; Valença, 1998).

A crescente preocupação com as matas nativas estimulou a plantação de florestas, especialmente das espécies de Pinus e Eucalipto. Juntos, esses gêneros totalizaram 95,2% das florestas plantadas no Brasil em 2021, mostrando a relevância do Pinus e do Eucalipto para o país e, conseqüentemente, para o abastecimento da indústria de aglomerados. (Roque; Valença, 1998; Ibá, 2022).

Assim, além de utilizar madeiras de reflorestamento, os painéis aglomerados possibilitam o aproveitamento quase que integral da madeira, já que as partículas geradas no processamento da tora são utilizadas na confecção do compósito (Araujo *et al.*, 2019).

Outra vantagem mencionada por Araujo *et al.*, (2019) é que os painéis de madeira reconstituída possibilitam a incorporação de diversos tipos de materiais durante seu processo produtivo, incluindo produtos repelentes a insetos e resíduos. Nesse trabalho, os painéis foram confeccionados incorporando resíduos de Politereftalato de etileno, provenientes de garrafas PET recicladas.

Estima-se que mais de 400 milhões de toneladas de plástico são produzidas anualmente em todo o mundo, sendo mais de um terço desse valor proveniente de embalagens. Os Estados Unidos são os maiores geradores de lixo plástico, são aproximadamente 70,8 milhões de toneladas de plástico gerados por ano. O Brasil ocupa a quarta posição, com 11,3 milhões de toneladas geradas anualmente, sendo os lixos plásticos de maior destaque no país as fraldas descartáveis e as garrafas PET (Heinrich Böll Stiftung, 2020).

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET), o Politereftalato de etileno é o plástico mais reciclado em todo o mundo. As embalagens produzidas com este material são 100% recicláveis e, após ser reciclado, é possível utilizar o PET na fabricação de vários produtos, como tecidos, roupas, carpetes, peças automotivas e em embalagens.

Atualmente é possível verificar pesquisas que introduziram o PET reciclado na produção de painéis aglomerados, com a finalidade de investigar e viabilizar uma nova aplicação para este resíduo. Neste trabalho, os painéis produzidos com PET apresentaram melhoria em diversas propriedades físicas, proporcionando uma destinação correta e tecnológica ao resíduo plástico.

Além da incorporação do PET e da utilização de madeira de reflorestamento, os painéis deste trabalho foram produzidos utilizando Breu Colofônia, o principal produto derivado da resina extraída do Pinus, sendo, portanto, um material proveniente de fonte natural e renovável (Coppen; Hone, 1995)

Embora seja utilizado como adesivo ou cola na indústria de papel (Coppen; Hone, 1995), a aplicação do Breu Colofônia como agente aglutinante de partículas em painéis aglomerados ainda é pouco estudada. Sendo assim, este trabalho buscou investigar o potencial do uso do Breu Colofônia no contexto de painéis de madeira, a fim de melhorar o aproveitamento da resina de Pinus, um recurso florestal não madeireiro fortemente explorado no Brasil.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Produzir painéis aglomerados e apresentar um estudo contendo informações sobre as propriedades físicas de painéis produzidos com partículas de *Pinus ssp.*, resina de Breu Colofônia e Politereftalato de etileno (PET).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar o desempenho dos painéis aglomerados produzidos considerando os requisitos da ABNT NBR 14810-2/2018.

Verificar a influência do PET nas propriedades físicas de painéis produzidos com Breu Colofônia através de uma análise comparativa dos resultados obtidos em cada mistura.

Melhorar as propriedades físicas relacionadas à resistência à absorção de umidade dos painéis.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção são fornecidas as principais informações no contexto de painéis de madeira aglomerada, trazendo definições e classificações importantes, descrevendo aspectos históricos, de produção e destacando a relevância econômica e ambiental deste compósito para a sociedade. Além disso, são apresentadas informações sobre cada um dos materiais envolvidos na confecção dos painéis e algumas de suas propriedades.

3.1 PAINÉIS DE MADEIRA AGLOMERADA

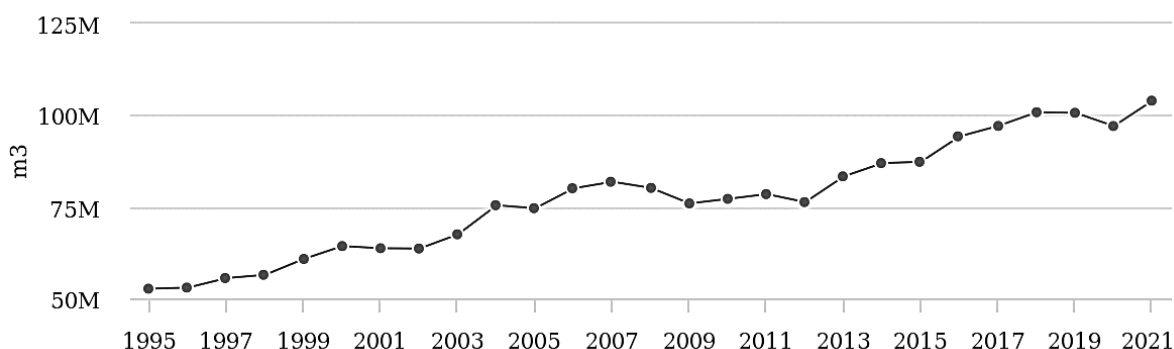
3.1.1 Histórico mundial e no Brasil

A produção de painéis utilizando partículas de madeira aglomeradas teve início em 1941, na Alemanha, com a finalidade de superar a escassez de recursos durante a Segunda Guerra Mundial. Assim, no ano de 1944, as primeiras máquinas industriais deste setor foram desenvolvidas (Nascimento; Lahr; Christoforo, 2015).

No Brasil, as primeiras indústrias de aglomerados foram instaladas em 1953 e 1954, denominadas “Solidor” e “Neoplan”. No entanto, a grande expansão do setor de painéis ocorreu somente na década de 1970, fazendo com que a capacidade produtiva instalada no país em 1967 fosse de 40 mil m³/ano para 630 mil m³/ano em 1975, com o objetivo de atender principalmente à demanda da indústria moveleira (Roque; Valença, 1998).

De acordo com os dados estatísticos disponibilizados pela Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO (2023), a produção mundial de painéis aglomerados foi de aproximadamente 104 milhões de metros cúbicos no ano de 2021. Na Figura 1 é possível acompanhar a evolução da produção mundial de painéis aglomerados entre os anos de 1995 e 2021.

Figura 1 – Produção mundial de painéis aglomerados (1995-2021)

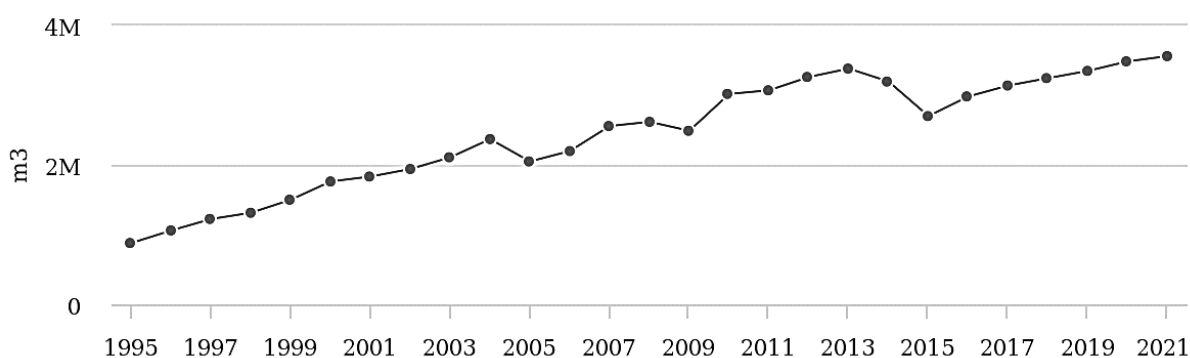


Fonte: FAO (2023).

No Brasil, a produção de painéis aglomerados ultrapassou 3 milhões de metros cúbicos em 2021 (FAO, 2023). Essa produção colocou o Brasil na oitava posição dos principais países produtores de painéis de madeira no ano de 2021, conforme o Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2022).

A Figura 2 exibe a evolução da produção brasileira de painéis aglomerados para o intervalo de 1995 a 2021, conforme dados da FAO.

Figura 2 – Produção de painéis aglomerados no Brasil (1995-2021)



Fonte: FAO (2023).

3.1.2 Definições

Ao realizar a extração das árvores, a madeira sólida passa por diversos processos de desagregação, reduzindo as dimensões das toras e convertendo-as em elementos menores. Parte desses elementos, como lâminas, sarrafos, partículas e fibras, tornam-se matéria-prima para a fabricação dos painéis de madeira reconstituída (Iwakiri, 2005).

De acordo com o formato do elemento de madeira empregado, os painéis podem ser divididos em laminados e particulados. No primeiro grupo, encontram-se os painéis compensados, fabricados com lâminas ou sarrafos de madeira. Já no grupo dos particulados, destacam-se o MDF (Figura 3a) e os painéis de madeira aglomerada (Figura 3b), que podem ser convencionais ou estruturais (Iwakiri, 2005).

Figura 3– Painéis particulados



(a) MDF (b) MDP

Fonte: FAO (2023).

Os painéis de madeira aglomerada convencionais, atualmente conhecidos como MDP (Medium Density Particleboard), são definidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2013) como painéis de partículas de madeira, aglutinadas com resina sintética termofixa e consolidadas pela ação de calor e pressão.

Gonçalves *et al.* (2018) afirmam que os painéis podem ser confeccionados com partículas de madeira de uma única espécie, com a mistura de diferentes espécies ou, ainda, acrescentando componentes lignocelulósicos, resíduos madeireiros, plásticos e outros materiais.

Conforme Roque e Valença (1998), além de diferentes espécies de madeira, outros materiais lignocelulósicos podem ser empregados na fabricação de painéis de madeira aglomerada, como bagaço de cana, palha de milho e praticamente qualquer outra fonte de fibra. No entanto, é a qualidade final do produto que determina a viabilidade de produzir as chapas com esses diferentes tipos de materiais.

Neste contexto, painéis produzidos com materiais lignocelulósicos como fibras de coco (Bispo *et al.*, 2022) e bagaço de cana-de-açúcar (Buzo *et al.*, 2019) já foram estudados. Além desses componentes, outras pesquisas investigaram a incorporação

de resíduos plásticos em painéis aglomerados, como o Poliestireno (Rodrigues *et al.*, 2023) e o PET (Cazella *et al.*, 2024).

3.1.3 Vantagens e aplicações

De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2017) e Araújo *et al.*, (2019), os painéis MDP são utilizados predominantemente pela indústria moveleira, sendo as principais aplicações em portas retas e usinadas, almofadas de portas, divisórias e móveis em geral, como tampos de mesas, estantes e laterais de armários.

A crescente produção de painéis de madeira aglomerada se justifica por alguns fatores. Dentre eles, podemos citar a possibilidade de adequação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis através do controle dos parâmetros envolvidos no processo de produção (Iwakiri, 2005). Além disso, o autor menciona que os aspectos indesejáveis da madeira (como os nós) podem ser eliminados com os painéis, assim como a anisotropia, permitindo que a resistência mecânica nas direções transversal e longitudinal do compósito sejam similares.

Outra vantagem elencada por Araújo *et al.*, (2019) é a possibilidade de aproveitar quase que integralmente a madeira. Além das toras utilizadas serem oriundas, predominantemente, de florestas plantadas, outras matérias-primas de menores dimensões podem ser aproveitadas na confecção dos painéis, incluindo resíduos de indústrias madeireiras como costaneiras, aparas, pontas, resto de laminação, aparas de lâminas e maravalhas.

Ademais, durante a confecção do MDP, existe a possibilidade de incorporar compostos químicos preservantes que aumentam a resistência do painel aos ataques biológicos (Iwakiri, 2005).

3.1.4 Classificações

Segundo a ABNT (2013), os painéis podem ser classificados de acordo com sua densidade. No intervalo de 551 kg/m³ a 750 kg/m³, os painéis são considerados de média densidade. Abaixo ou acima dos limites dessa faixa, os painéis são classificados como de baixa e alta densidade, respectivamente.

Outra classificação importante leva em consideração a granulometria e distribuição das partículas, dividindo os painéis aglomerados em homogêneos e

heterogêneos: as chapas homogêneas são confeccionadas com apenas uma mistura e, por isso, apresentam uma única camada, enquanto as chapas heterogêneas são formadas por múltiplas camadas, três ou mais, sendo as camadas externas constituídas de partículas menores e a camada interna composta por partículas maiores (Iwakiri, 2005).

A principal classificação, feita de acordo com a ABNT (2018), divide os painéis em 6 tipos (de P2 a P7) e estabelece a sua aplicação final. Resumidamente:

- 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.

Essa classificação feita pela normativa brasileira depende diretamente do desempenho físico e mecânico dos painéis nos ensaios realizados. Os requisitos exigidos são apresentados para cada propriedade e variam de acordo com a faixa de espessura nominal dos painéis. A Tabela 1 exhibe os requisitos exigidos na classificação de painéis com espessura superior a 4 mm até 6 mm.

Tabela 1 – Requisitos para propriedades de painéis com espessura > 4 a 6 mm

Propriedade	U (%)	I24h (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	RTP (MPa)
P2	5 – 12	25	12	1950	0,45
P3		20	14	1950	0,50
P4		21	16	2200	0,45
P5		14	19	2450	0,45
P6		16	20	2900	0,65
P7		10	21	3100	0,75

Fonte: adaptado da ABNT (2018).

Nota: U – Teor de umidade; I24H – Inchamento após 24h; MOR – Resistência a flexão estática; MOE – Módulo de elasticidade na flexão; RTP – Resistência a tração perpendicular.

3.1.5 Processo de fabricação de aglomerados

Existem diversas etapas envolvidas no processo de produção industrial de painéis de madeira aglomerada. Essas etapas são apresentadas de forma resumida nos parágrafos a seguir.

A primeira etapa consiste na geração de partículas. Em sua maioria, as partículas são originadas das toras de madeira de florestas plantadas, mas também podem advir de serrarias ou resíduos de indústrias madeireiras. Inicialmente, a casca das toras é removida por meio de descascadores e o restante é levado para picadores para ser transformado em cavacos. Caso necessário, estes podem ser reduzidos ainda mais por meio de moinhos (Iwakiri, 2005).

A segunda etapa é a de secagem das partículas. Segundo Nascimento, Lahr e Christoforo (2015), a redução do teor de umidade é essencial para a qualidade dos painéis. Para isso, as partículas passam por um secador, sendo o mais comumente utilizado pelas indústrias o do tipo tambor rotativo. Nele, as partículas entram com elevado teor de umidade (de 35 a 120%) e são secas por correntes de ar quente, atingindo um teor de umidade de 3% na saída.

Na terceira etapa é feita a separação e classificação das partículas, a fim de selecionar as partículas com dimensões adequadas para a confecção das chapas. Através de peneiras vibratórias com diferentes malhas, de maior e menor abertura, as partículas são separadas e classificadas de acordo com suas dimensões. Já quando se utiliza peneirador pneumático, a classificação ocorre em função do peso das partículas (Iwakiri, 2005).

A quarta etapa é denominada “encolagem” ou “resinagem”, em que ocorre a aplicação e a mistura do adesivo com as partículas. Conforme os autores Iwakiri (2005) e Nascimento, Lahr e Christoforo (2015), o equipamento mais utilizado pelas indústrias para a realização da “encolagem” é a encoladeira em formato cilíndrico, dotada de bicos que realizam a pulverização do adesivo sobre as partículas de maneira uniforme. Nessa etapa, além do teor de adesivo a ser aplicado, deve-se analisar o tipo de painel, pois um misturador é suficiente para painéis homogêneos, no entanto, se as chapas forem heterogêneas, as camadas externas demandam maior teor de adesivo que as camadas internas, exigindo processos separados.

Na quinta etapa é feita a formação do colchão. Essa etapa ocorre na estação formadora, equipamento composto de reservatório e esteira móvel. Nele, as partículas

de madeira misturadas com o adesivo são depositadas em quantidade adequada (que garanta a densidade e a espessura previstas para o painel) e lançadas sobre uma esteira móvel, formando os colchões (Iwakiri, 2005).

Na sexta etapa é feita a prensagem do colchão de partículas. Nascimento, Lahr e Christoforo (2015) explicam que, inicialmente, é feita a pré-prensagem a frio, que consiste em uma compactação prévia do colchão a fim de retirar o ar presente em seu interior. Por fim, o colchão é encaminhado à prensa, ajustando-se os parâmetros de pressão (responsável por densificar o painel, com intensidade em torno de 4MPa), temperatura (responsável pela cura da resina, por isso seu valor depende do tipo de adesivo aplicado, sendo a temperatura ideal em torno de 180°C para resina a base de formaldeído) e tempo de prensagem, que varia de 15 a 20 segundos/mm de espessura.

A sétima etapa é destinada ao acabamento dos painéis, que acontece após a prensagem e o resfriamento dos painéis até atingirem a temperatura e umidade de equilíbrio com o ambiente. Nessa fase, os painéis já estão prontos para o esquadrejamento e cortes em dimensões comerciais. Por fim, é feito o lixamento, que uniformiza a espessura do painel e confere melhor acabamento a superfície, adequando-a para a aplicação de materiais de revestimento (Iwakiri, 2005).

3.1.6 Fatores que influenciam no desempenho final dos painéis

Durante o processo de confecção de painéis aglomerados, algumas variáveis podem ser controladas para melhorar o desempenho das chapas produzidas (Iwakiri, 1989). Nos itens subsequentes, são elencadas algumas variáveis que influem na qualidade final dos painéis.

3.1.6.1 Densidade

É possível identificar dois fatores que interferem diretamente na densidade final do painel: a densidade da madeira utilizada e a razão de compactação (Kelly, 1977).

As espécies de madeira que possuem baixa massa específica são as mais recomendadas para a confecção de chapas aglomeradas, pois garantem uma boa razão de compactação (relação entre a massa específica da chapa e a massa específica da madeira empregada). A razão de compactação, por sua vez, representa

o grau de densificação do painel e os valores considerados mais adequados ficam na faixa de 1,3 a 1,6 (Iwakiri *et al.*, 2006).

3.1.6.2 Teor de umidade

De acordo com Iwakiri (1989), o teor de umidade do colchão interfere no tempo de prensagem e no desenvolvimento do gradiente vertical de densidade.

Quanto ao tempo de prensagem, Kelly (1977) explica que a umidade presente na superfície do colchão, em contato com os pratos quentes da prensa, evapora e migra para o centro, acelerando o aquecimento do núcleo e a cura da resina nas camadas internas do painel. No entanto, se o teor de umidade for muito elevado, torna-se necessário realizar a liberação da pressão exercida pelos gases gerados e o tempo de ciclo de prensagem se torna mais longo.

Além disso, o excesso de umidade interfere na reação química da resina e tende a aumentar o gradiente de densidade vertical, ou seja, ocorre maior densificação da superfície. Assim, a resistência a flexão aumenta, mas a baixa densidade das camadas internas piora a resistência à ligação interna do painel (Kelly, 1977).

3.1.6.3 Geometria das partículas

De acordo com Iwakiri (2005), as dimensões das partículas definem a sua razão de esbeltez (relação entre comprimento e espessura das partículas). Além das propriedades mecânicas, esse índice afeta o acabamento superficial e das bordas do painel, a aplicação de revestimentos e a usinabilidade. Para painéis homogêneos, o autor menciona que a razão de esbeltez em torno de 120 proporciona maior resistência à flexão estática e, acima deste valor, permanece estável.

A geometria das partículas também interfere na área superficial específica das partículas e no consumo relativo de adesivo (disponibilidade de resina por unidade de área das partículas). No caso de uma razão de esbeltez menor (e conseqüente área superficial específica menor), a disponibilidade de resina por unidade de área das partículas aumenta, melhorando a propriedade de ligação interna do painel (Iwakiri, 2005).

3.1.6.4 Acidez

A depender do tipo de resina, a acidez da madeira facilita ou retarda o processo de cura. Madeiras com pH mais ácido podem provocar a pré-cura da resina uréia-formaldeído ainda na fase de fechamento da prensa, enquanto o pH menos ácido tende a retardar a cura da resina fenol-formaldeído. (Iwakiri *et al.*, 2006).

Além da acidez da madeira, o pH da resina também é importante, devendo estar na faixa de 2,5 a 11,0, a fim de evitar a degradação das fibras de madeira. A aplicação do adesivo também pode ser prejudicada se o pH estiver muito baixo (Iwakiri, 2005).

3.1.6.5 Teor de extrativos

De acordo com Razera (2006), a madeira é constituída predominantemente por celulose, polioses e lignina, mas possui em menor quantidade componentes como graxas, resinas, ceras, óleos e amido, denominados de extrativos.

Os extrativos têm efeito sobre a permeabilidade da madeira e reduzem sua higroscopicidade. A alta concentração desses componentes nas camadas superficiais da madeira, além de dificultar a passagem de água e retardar a sua taxa de evaporação, interage negativamente com o adesivo, prejudicando a cura e aumentando o tempo necessário de prensagem do painel (Razera, 2006).

3.1.6.6 Resina

Conforme mencionado por Iwakiri (1989), os painéis produzidos com maior teor de resina apresentam propriedades físicas e mecânicas melhores. No entanto, como ela eleva o custo final do painel, sua proporção na mistura deve ser otimizada (Iwakiri, 1989).

3.1.6.7 Condições de prensagem: tempo, temperatura e pressão

Segundo Kelly (1977), a função da prensa aquecida na produção de painéis aglomerados é consolidar o material na espessura e densidade desejadas e realizar a polimerização do adesivo. Como o calor flui da superfície (em contato com as placas

quentes da prensa) para as camadas internas do painel, o aquecimento ao longo de sua espessura não é uniforme. Assim, a cura do adesivo na superfície ocorre antes da cura do adesivo presente na região interna e mais fria do painel.

Por conta disso, o tempo de prensagem deve ser suficiente para assegurar que o núcleo também atinja a temperatura adequada de cura da resina sem, no entanto, degradar a superfície em contato com a prensa. (Kelly, 1977). Desta forma, quanto maior a espessura prevista para o painel e quanto maior for a umidade do colchão, maior é o tempo de prensagem (Iwakiri, 2005).

O tempo de fechamento da prensa também interfere na qualidade do painel, pois modifica seu gradiente de densidade vertical. Quando a transferência de calor da superfície para as camadas internas ocorre em menor tempo (fechamento rápido da prensa), a superfície sofre maior densificação, melhorando a resistência à flexão das camadas externas. Em contrapartida, o fechamento lento da prensa diminui o gradiente vertical de densidade, melhorando a ligação interna do painel (Kelly, 1977).

Um dos fatores que determinam a temperatura de prensagem é o adesivo empregado, já que a temperatura de cura varia para cada tipo de resina. Além disso, quanto maior a temperatura utilizada no processo, menor tende a ser o tempo de prensagem necessário (Iwakiri, 2005).

Embora uma pressão seja minimamente necessária para que o painel atinja a espessura final desejada, quanto maior for a densidade projetada para o painel, maior deve ser a pressão exercida sobre a chapa. (Iwakiri, 2005). Em contrapartida, o aumento da temperatura de prensagem resulta em maior plasticidade das partículas de madeira, diminuindo a pressão exigida nessa etapa (Kelly, 1977).

3.2 MADEIRAS

Devido sua grande versatilidade, a madeira é um recurso utilizado pelo homem desde a antiguidade. Apesar de sua importância, estima-se que somente 35% de cada tora seja transformada em produto serrado, sendo o restante considerado resíduo não aproveitado pela indústria (Feitosa, 2012).

No ano de 2021, a maior parte dos resíduos industriais e florestais gerados pelas empresas associadas à Indústria Brasileira de Árvores foi direcionado à geração de energia (63,6%) ou mantidos em campo (17,2%), conforme o Relatório Anual da IBÁ (2022).

Além do impacto ao meio ambiente gerado pela exploração da madeira e pelo desperdício que ocorre em seu processamento, a destinação tradicionalmente dada aos resíduos da madeira, principalmente como biomassa para geração de energia, subaproveita o potencial econômico deste recurso (Feitosa, 2012)

3.2.1 Situação florestal no Brasil e no mundo

De acordo com o relatório publicado pela FAO (2020), a cobertura florestal mundial estimada é de 4 bilhões de hectares. O Brasil representa aproximadamente 12% dessa área, com 496,6 milhões de hectares de florestas. Embora essa cobertura coloque o país em 2º lugar no ranking mundial (ficando atrás somente da Rússia), entre os anos de 2010 e 2020 o Brasil foi o país que sofreu a maior perda média de área florestal.

Em 2021, as florestas plantadas totalizaram uma cobertura de 9,93 milhões de hectares no Brasil. Embora seja uma área significativa, essas florestas representam menos de 2% de toda a cobertura florestal do país. Os dois gêneros mais plantados no Brasil são o Eucalipto (75,8%) e o Pinus (19,4%). Juntos, eles totalizam 9,46 milhões de hectares de florestas plantadas no Brasil (IBÁ, 2022).

3.2.2 Madeira de Pinus

De acordo com a IBÁ (2022), o Pinus representa 19,4% das florestas plantadas brasileiras, com uma área de 1,93 milhões de hectares. Concentrada principalmente na região sul, os estados do Paraná e Santa Catarina são os que mais se destacam.

A fim de caracterizar melhor esse pinheiro, Oliveira et al. (2006); Ballarin e Palma (2003), selecionaram árvores de diferentes idades (9, 13, 20 e 37 anos) da espécie *Pinus taeda*, de onde foram retirados os corpos de prova utilizados nos estudos. Após a secagem, até atingirem um teor de umidade de 12%, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de densidade e flexão estática. Os estudos confirmam que vários fatores podem interferir nas propriedades da madeira, dentre eles a idade da árvore e a região da tora em que os corpos de prova foram retirados.

Na Tabela 2, verificam-se os resultados médios obtidos nessas duas pesquisas, é possível identificar a variação que ocorre nas propriedades da madeira, ainda que da mesma espécie.

Tabela 2 – Propriedades do *Pinus taeda* L

Propriedade	Idade da árvore			
	9 anos	13 anos	20 anos	37 anos
Densidade aparente U _{12%} (g/cm ³)	0,430	0,490	0,530	0,605
Módulo de ruptura (MPa)	53,14	67,28	79,97	107,02
Módulo de elasticidade (MPa)	-	-	-	13812,00

Fonte: Adaptado de Ballarin e Palma (2003); Oliveira *et al.* (2006).

As espécies de *Pinus* podem ser aproveitadas por diferentes indústrias e para diversos fins. Nesse contexto, destacam-se a construção civil, as indústrias de papel e celulose, as serrarias e as indústrias produtoras de painéis compensados e aglomerados. O gênero também é explorado para produção de dormentes, para extração de resina e geração de energia através da biomassa (Martó, 2006).

O grande potencial das espécies de *Pinus* para a confecção de painéis aglomerados se deve a dois principais fatores: trata-se de uma madeira de baixa massa específica (essencial para o desempenho final dos painéis) e que apresenta rápido crescimento, intensificando a oferta dessa matéria-prima (Iwakiri *et al.*, 2006).

De acordo com Martó (2006), as espécies de *Pinus* mais recomendadas para a produção de painéis de partículas (aglomerado, OSB, waferboard) são: *P. taeda*, *P. oocarpa*, *P. pinea*, *P. palustris*, *P. pinaster*, *P. patula*, *P. caribaea*, *P. chiapensis*, *P. maximinoi* e *P. tecunumannii*.

A aplicabilidade desse gênero na confecção de chapas de partículas é estudada há anos. Iwakiri (1989), produziu e avaliou painéis utilizando 4 espécies diferentes de *Pinus*: *taeda*, *serotina*, *glabra* e *palustris*, empregando resina fenol-formaldeído no teor de 8% em relação ao peso seco das partículas.

Iwakiri *et al.* (2001), também confeccionaram painéis aglomerados com diversas espécies de *Pinus*, sendo elas: *oocarpa*, *caribaea*, *chiapensis*, *maximinoi* e *tecunumannii*. Independentemente da espécie, os autores verificaram que não houve diferença significativa nas propriedades mecânicas (MOR e MOE) das chapas, sendo constatado o potencial uso desse gênero para a confecção de painéis aglomerados.

3.3 ADESIVOS

3.3.1 Definições, classificações e aspectos gerais

De acordo com a NBR 14810-1, o adesivo (ou resina) consiste em uma substância orgânica ou inorgânica utilizada com a finalidade de aderir as partículas de madeira que constituem os painéis (ABNT, 2013).

Segundo Nascimento, Lahr e Christoforo (2015), os adesivos utilizados na colagem de madeira podem ser naturais ou sintéticos, sendo que os naturais possuem origem animal (glutina, caseína e albumina), vegetal (soja, mamona e tanino) ou do amido.

Já os adesivos sintéticos se dividem em dois grupos: termoplásticos e termofixos. Para a produção de painéis aglomerados, o grupo dos adesivos termofixos (ou termoendurecedores) é o que mais se destaca, pois as modificações químicas e físicas que ocorrem ao serem aquecidos são irreversíveis, tornando-os rígidos e insolúveis. Neste grupo estão enquadradas as resinas ureia-formaldeído, melamina-formaldeído; fenol-formaldeído, resorcina-formaldeído e tanino-formaldeído (Iwakiri, 2005).

A escolha adequada do tipo de adesivo depende de alguns fatores, dentre eles o uso para o qual o painel se destina. A resina composta por ureia, por exemplo, apresenta baixa durabilidade em condições que envolvam alta temperatura e umidade, por isso ela é recomendada para painéis de uso em ambientes internos. A resina fenólica, por sua vez, apresenta alta resistência à umidade (Selbo, 1975).

Os adesivos sintéticos são utilizados por 99% das empresas produtoras de painéis aglomerados, sendo o mais empregado o composto de ureia formaldeído (Nascimento; Lahr; Christoforo, 2015). Essa grande utilização se justifica pelo baixo custo da resina ureia-formaldeído, por sua facilidade de manuseio, cura rápida e por ser incolor, não conferindo cores indesejáveis ao painel (Iwakiri, 2005).

Apesar das diversas vantagens, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – EPA alerta que a exposição ao formaldeído encontrado nesse tipo de resina pode causar efeitos adversos à saúde. O formaldeído consiste em um gás incolor, inflamável à temperatura ambiente e que possui odor forte. Ele pode causar irritação da pele, olhos, nariz, garganta e, a depender do nível de exposição, pode causar também alguns tipos de câncer.

Neste sentido, torna-se essencial que os painéis comercializados sejam produzidos a partir de matérias-primas que não agridam o meio ambiente ou a saúde humana e que atendam aos requisitos normativos de desempenho. Além de promover a sustentabilidade, produzir painéis de madeira considerando essas demandas é imprescindível para a isonomia competitiva do setor, enaltece a imagem do produto junto aos usuários da indústria moveleira e da construção civil e defende os interesses da sociedade brasileira em geral (IBÁ, 2022).

3.3.2 Resina de Pinus

A resina proveniente das árvores do gênero *Pinus*, um produto florestal não madeireiro, é utilizada desde o Egito antigo com finalidade religiosa (mumificação de corpos) e no período colonial, pela construção naval norte-americana, com o objetivo de calafetar peças de madeira. Atualmente a resina de *Pinus* tem grande importância nas indústrias de tintas e vernizes, cola para papel, borrachas e adesivos (Neves *et al.*, 2006).

Segundo Marto (2006), grande parte das espécies de *Pinus* são indicadas para a extração de resina, tais como *P. taeda*, *P. elliottii*, *P. tecunumanii*, *P. caribaea*, *P. pinaster*, *P. sylvestris*, *P. oocarpa* e tantas outras. As espécies *Pinus elliotti*, *Pinus caribaea*, *Pinus pallustris*, *Pinus pinaster*, *Pinus taeda* e *Pinus sylvestris* são responsáveis por quase toda a produção mundial de resinas provenientes deste gênero e, no Brasil, o *Pinus elliotti* é a espécie considerada mais importante, pelo grande cultivo nacional e por apresentar a mais alta produção de resina (Indústrias Químicas Carbomafra S.A., 1978).

Ribas (2002) explica que a extração da resina ocorre a partir de um processo denominado resinagem, que pode acontecer de três formas distintas: por meio de tocos e galhos remanescentes da exploração, utilizando-se solventes a vapor; através do processo de fabricação de celulose por sulfato, que gera uma mistura de resina e óleos (“tall oil”); a partir de cortes (estrias) da casca de árvores vivas.

De acordo com as Indústrias Químicas Carbomafra S.A. (1978), a obtenção da resina bruta – ou goma resina – a partir de plantas vivas é uma técnica que vem sendo constantemente aprimorada, gerando um bom rendimento, sem deixar de preservar a árvore para o posterior aproveitamento da madeira.

Existem alguns fatores que influenciam na produtividade de resina, que podem ser intrínsecos (genéticos) ou físicos (externos). Alguns desses fatores são: a espécie submetida à resinagem, as condições ambientais (temperatura, umidade, precipitação, estação em que ocorre a resinagem), a fertilidade do solo, as dimensões da planta (diâmetro, altura e tamanho da copa) e sua idade (Fonseca; Kageyama, 1978; Gurgel; Faria, 1978).

Além disso, de acordo com Ribas (2002), é possível aumentar a produção de resina através da aplicação de estimulantes, com destaque para o ácido sulfúrico, que atua tanto de forma química (tornando a resina mais fluida), quanto de forma física (expandindo o calibre dos canais resiníferos).

Selecionadas as árvores com as características adequadas (idade, diâmetro, tamanho da copa), a resinagem se inicia com a retirada da parte grossa da casca da árvore. Em seguida, com uma ferramenta chamada estriador, são feitos cortes na casca (estrias), com profundidade suficiente para alcançar o lenho (cerne) sem feri-lo. Então, a resina escoar até um recipiente (sacos plásticos acoplados à árvore) onde fica depositada para ser posteriormente coletada (Indústrias Químicas Carbomafra S.A., 1978). A Figura 4 ilustra essa técnica de resinagem.

Figura 4 – Técnica de resinagem a partir de árvores vivas



Fonte: Pastl (2021).

De acordo com Neves *et al.* (2006), a goma resina obtida por meio da exsudação é uma mistura de hidrocarbonetos de cadeia longa, compostos por vários

ácidos resínicos que, após a destilação, resultam em Breu Colofônia (parte sólida) e terebintina (parte volátil). Antes de sofrer qualquer processamento, a resina bruta é composta de aproximadamente 70% de Breu Colofônia, 15% de terebintina e 15% de impurezas e água (Coppen; Hone, 1995).

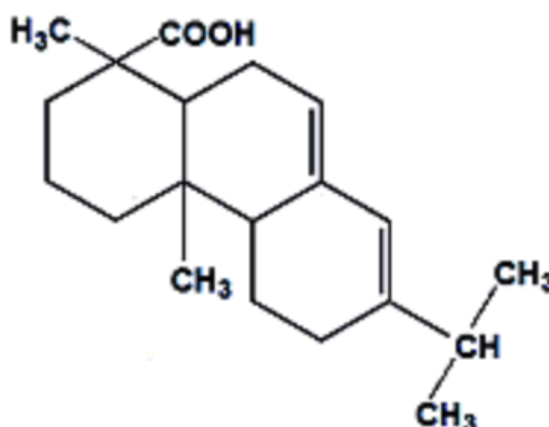
No estudo realizado por Brito *et al.* (1978), foram avaliadas as resinas provenientes de 4 espécies de Pinus (*P. caribaea* var. *bahamensis*, *P. oocarpa*, *P. kesya* e *P. elliottii* var. *elliottii*) e constatou-se que as espécies *P. elliottii* e *P. caribaea* proporcionaram maior rendimento de resina. Além da quantidade, os autores também analisaram a qualidade e a composição do material extraído, identificando teores de 78,0 a 79,6% de Breu Colofônia e 13,3 a 16,1% de terebintina para a espécie *P. elliottii*. A pesquisa de Migliorini, Brito e Barrichelo (1980) também avaliou a composição da resina de algumas espécies de Pinus (incluindo o *P. elliottii*) e encontraram um rendimento de 77,7% de Breu Colofônia e 17,2% de terebintina nos pinheiros dessa espécie.

De acordo com Coppen e Hone (1995), para realizar a separação de seus dois componentes – Breu Colofônia e terebintina – a resina precisa ser submetida aos processos de limpeza e destilação. Na etapa de limpeza, realizada através da filtração, as impurezas sólidas são removidas, tais como detritos florestais, cascas de árvores ou insetos. Posteriormente, a resina é submetida a equipamentos e procedimentos diversos (que variam entre os países produtores) para a realização da destilação. No tipo mais comum – a destilação à vapor – a resina é aquecida, permitindo que a parte sólida (Breu Colofônia) seja separada da parte volátil (terebintina).

A colofônia, também conhecida como Breu Colofônia, é considerada o produto mais importante resultante da destilação da resina de Pinus. Trata-se de um sólido quebradiço, transparente e vítreo, insolúvel em água e solúvel em alguns solventes orgânicos (Coppen; Hone, 1995).

O Breu Colofônia é quimicamente constituído por elementos como carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, que formam uma mistura complexa composta por aproximadamente 90% de ácidos resínicos. O ácido abiético, o mais predominante, tem sua estrutura molecular exibida na Figura 5. Outras substâncias neutras também estão presentes (como álcoois diterpênicos, aldeídos e hidrocarbonetos), mas em menor quantidade, em torno de 10% (Coppen; Hone, 1995; Schappo, 1973).

Figura 5 – Estrutura molecular do ácido abiético



Fonte: Schappo (1973).

A Tabela 3, adaptada de Schappo (1973), apresenta algumas propriedades do Breu Colofônia e seus respectivos valores padronizados. Segundo o autor, os principais critérios para avaliar a qualidade do Breu Colofônia levam em consideração a cor e o número de saponificação. Além disso, o ponto de fusão também é um indicativo de pureza do material, variando de 63 a 82°C.

Tabela 3 – Propriedades do Breu Colofônia

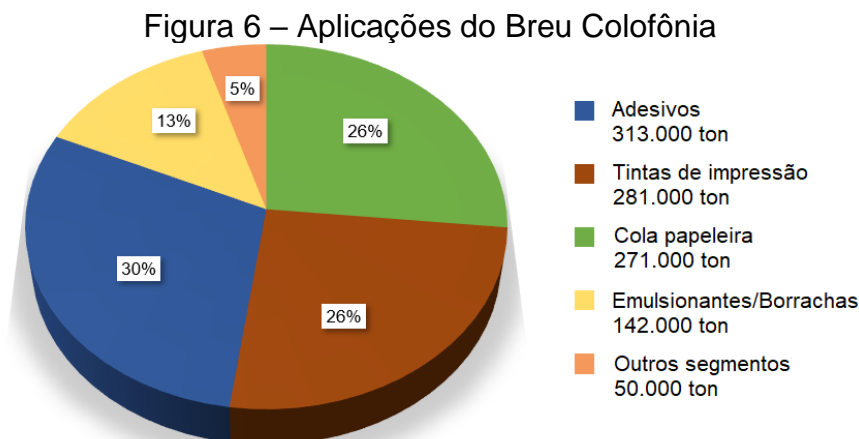
Propriedade	Parâmetro	Unidade
Ponto de fusão	63 – 82	°C
Densidade	1,045 – 1,086	g/cm ³
nº acidez	140 – 168	mg KOH/g
nº saponificação	130 – 190	mg KOH/g
Material insaponificável	5 – 12	%
Solubilidade	em solventes orgânicos	–

Fonte: Schappo (1973).

Coppen e Hone (1995), esclarecem resumidamente que: quanto mais baixo o ponto de fusão (ou de amolecimento), mais baixa é a qualidade ou pureza da colofônia; o número de saponificação e o número de acidez elevados representam um Breu Colofônia de melhor qualidade; quanto maior o teor de materiais insaponificáveis, menor é a qualidade da colofônia; a coloração mais clara é mais desejável, indicando uma qualidade superior do Breu Colofônia.

Segundo Coppen e Hone (1995), o Breu Colofônia possui diversas aplicações, sendo as mais relevantes a fabricação de adesivos, tintas, colas e borracha sintética. Este componente também é usado em outros segmentos, tais como: cosméticos,

indústrias de sabão e detergentes e indústrias alimentícias de chicletes (ou gomas de mascar). A Figura 6 mostra as aplicações mais usuais do Breu Colofônia



Fonte: Naval Store apud Neves *et al.* (2006).

3.4 POLÍMEROS PLÁSTICOS

3.4.1 Definições e aspectos gerais

Polímeros são materiais compostos por pequenas moléculas, os monômeros, que se unem através de um processo químico denominado polimerização, formando moléculas maiores (macromoléculas). As substâncias ricas em carbono, como o petróleo e o gás natural, são as principais matérias primas utilizadas na produção dos polímeros (Michaeli *et al.*, 1995).

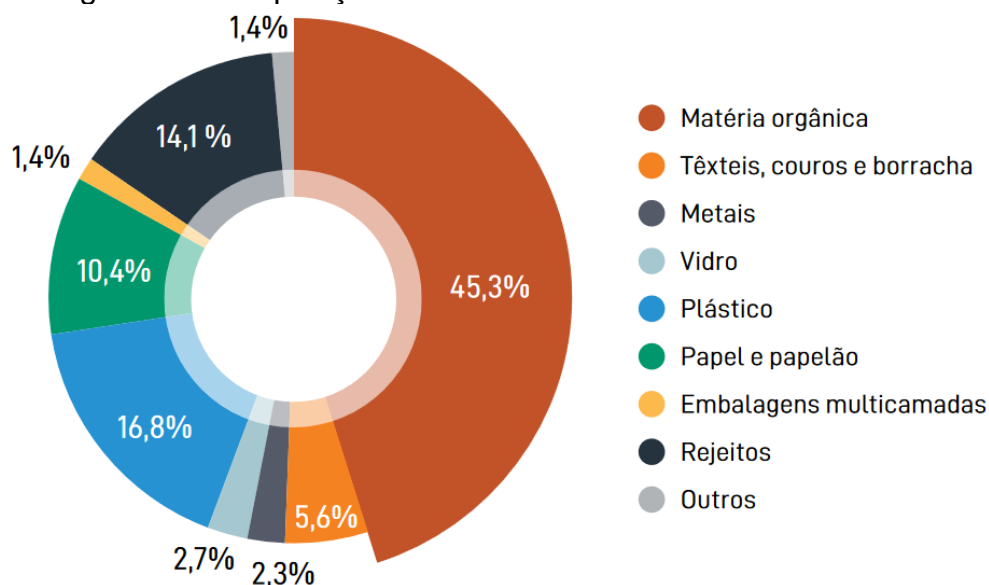
De acordo com Callister e Rethwisch (2016), existem diversos tipos de materiais poliméricos, que podem ser classificados conforme sua aplicação final em: plásticos, borrachas (elastômeros), fibras, revestimentos, adesivos, espumas e filmes. Segundo os autores, o grupo dos polímeros plásticos pode ser dividido em termoplásticos ou termorrígidos (termofixos), dependendo do seu comportamento ao serem submetidos a uma elevação de temperatura.

O polímero termofixo, ao final de seu processo produtivo, endurece e torna-se um material rígido e estável às variações de temperatura. Isso significa que ele não mais se funde ou amolece quando aquecido posteriormente. Em razão disso, a maioria dos polímeros termofixos não são recicláveis (Michaeli *et al.*, 1995; Callister; Rethwisch, 2016).

Já o polímero termoplástico é aquele que amolece ao ser aquecido e endurece quando resfriado, podendo ser fundido várias vezes. A possibilidade de reciclagem desse material é uma característica importante, já que esse grupo representa a maioria dos polímeros. Alguns exemplos de termoplásticos comuns são o Polietileno (PE), Policloreto de vinila (PVC), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS) e o Politereftalato de etileno (PET) (Michaeli *et al.*, 1995; Callister, Rethwisch, 2016).

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2020), aproximadamente 79,0 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) foram gerados no Brasil durante o ano de 2019. A Figura 7 mostra que os plásticos representam 16,8% do total de RSU gerados que foram coletados naquele ano, ficando atrás somente do resíduo orgânico. Ao todo, 13,35 milhões de toneladas de plásticos foram descartados, sendo o resíduo mais relevante dentre os recicláveis.

Figura 7 – Composição dos RSU descartados no Brasil em 2019



Fonte: ABRELPE (2020).

3.4.2 PET

O Politereftalato de etileno (PET), descoberto em 1941 pelos ingleses, foi utilizado inicialmente na indústria têxtil, a fim de suprir a escassez de matéria prima ocasionada pela Segunda Guerra Mundial. Posteriormente, em 1970, os Estados Unidos produziram as primeiras embalagens de PET. Já no Brasil, a produção de embalagens utilizando este polímero data da década de 1980, mas somente ganhou proporção no mercado a partir de 1993. A principal aplicação do PET está no setor de alimentos e bebidas, sendo facilmente encontrado nas embalagens de água, óleo ou refrigerante (ABIPET, [20--?]). A Tabela 4 apresenta algumas propriedades relevantes do PET.

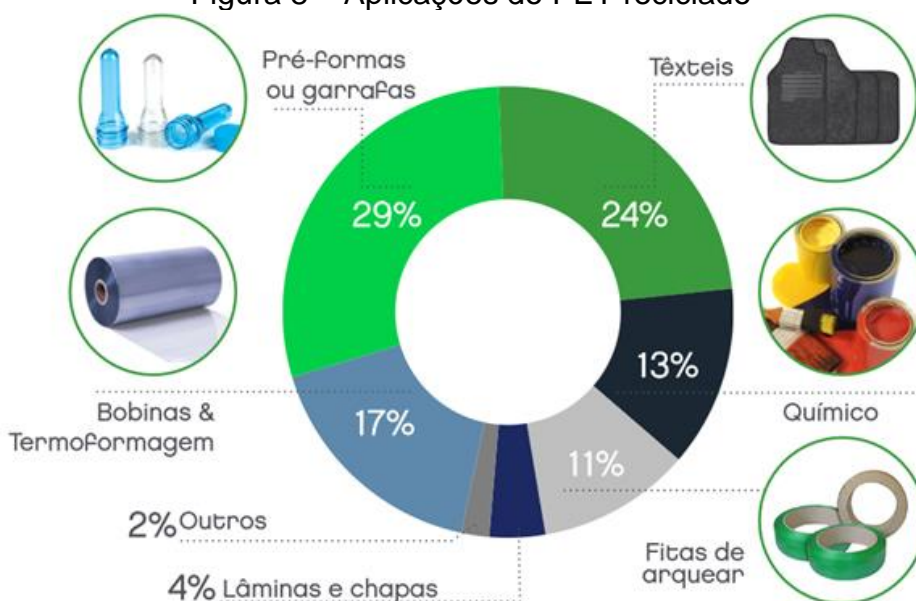
Tabela 4 – Propriedades do PET

Propriedade	Parâmetro	Unidade
Temperatura de transição vítrea	69	°C
Temperatura de fusão	265	°C
Massa específica	1,35	g/cm ³
Limite de escoamento	59,30	MPa
Módulo de elasticidade	2,76 – 4,14	GPa

Fonte: Callister e Rethwisch (2016).

De acordo com o 12º Censo da reciclagem do PET no Brasil, realizadas pela ABIPET (2022), 56,4% das embalagens PET descartadas pelos consumidores brasileiros foram recicladas em 2021, totalizando 359 mil toneladas de PET reciclado. As aplicações mais comuns do PET reciclado continuam sendo na confecção de embalagens e na indústria têxtil (com fibras de poliéster), conforme se vê na Figura 8.

Figura 8 – Aplicações do PET reciclado



Fonte: ABIPET (2022).

3.4.3 Aplicação do PET em painéis de madeira

Além das aplicações usuais, alguns estudos analisam alternativas para o aproveitamento do PET no setor da construção civil, incorporando-o aos materiais convencionais, como concreto, misturas asfálticas e madeira. Cazella *et al.* (2024), trabalharam com este resíduo plástico junto a partículas de madeira, para a confecção de chapas MDP. A resina utilizada foi a poliuretana derivada do óleo de rícino (PUR), os painéis foram produzidos substituindo 30 e 50% das partículas de madeira por PET e não houve alteração nas condições de prensagem.

Posteriormente, os painéis foram submetidos aos ensaios de densidade, teor de umidade, absorção e inchamento, flexão estática e tração perpendicular. Como resultado, os autores observaram melhor desempenho físico e mecânico dos painéis à medida em que o teor de PET aumentou. Para a proporção madeira/PET equivalente a 50/50 com 10% de PUR, os painéis puderam ser classificados pela NBR 14810-2: 2018 como painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições secas (P6).

Já na pesquisa de Iždinský, Tóth e Kúdela (2013), foram confeccionados painéis heterogêneos utilizando adesivo ureia-formaldeído, partículas de madeira e flocos de PET reciclado em proporções variadas. As chapas produzidas com a maior

quantidade de PET obedeciam a relação madeira/PET igual a 70/30, tanto nas camadas externas, quanto no centro.

Após a execução dos ensaios, os autores verificaram que os painéis com maior quantidade de PET alcançaram as melhores propriedades físicas, como menor inchamento em espessura e menor absorção de água após 24 horas. No entanto, as propriedades mecânicas avaliadas neste estudo (resistência à flexão estática e tração perpendicular) não foram beneficiadas com a adição do polímero.

Apesar da divergência no desempenho mecânico, em ambas as pesquisas supracitadas, a incorporação do PET reciclado propiciou algum tipo de melhoria nos painéis produzidos, principalmente nas propriedades físicas envolvendo a presença de água. Essa análise mostra que ainda existe necessidade de se avaliar a utilização do PET neste contexto, mas sua aplicação em chapas aglomeradas se mostrou uma alternativa em potencial para a destinação correta do resíduo plástico.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

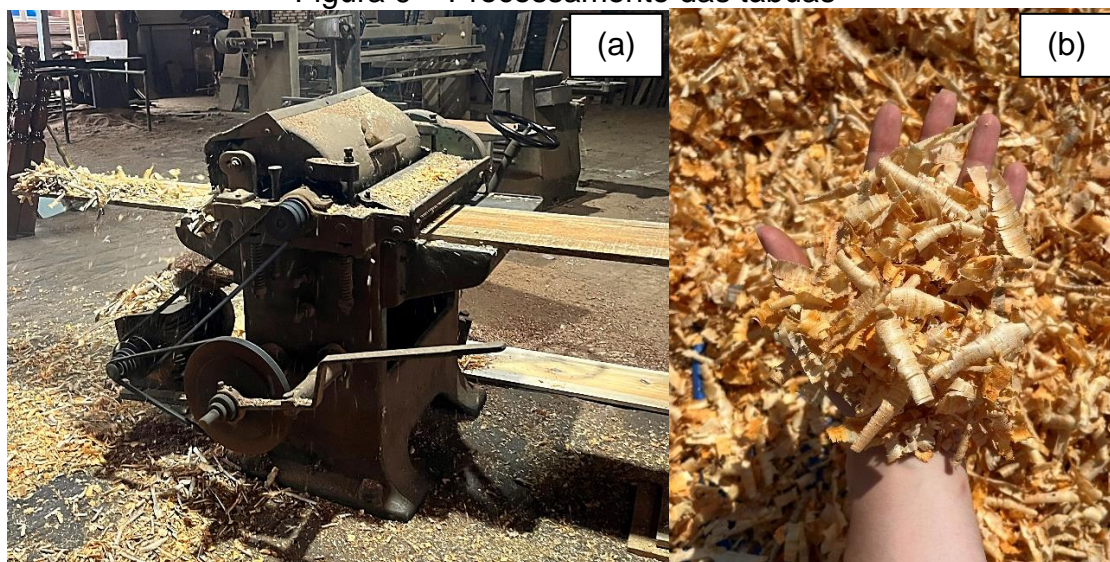
Nesta seção estão descritos os materiais envolvidos na produção dos painéis (madeira, adesivo e resíduo), bem como os procedimentos metodológicos adotados, os equipamentos utilizados e os ensaios físicos e mecânicos realizados.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 *Pinus ssp*

As partículas de madeira *Pinus* utilizadas foram obtidas através do processamento de tábuas da espécie *Pinus ssp*. Para isso, foi utilizada uma plaina desengrossadeira, onde as tábuas de madeira puderam ser transformadas em cavacos ou maravalhas. O equipamento utilizado e as partículas obtidas ao final dessa etapa podem ser vistos nas Figuras 9a e 9b, respectivamente.

Figura 9 – Processamento das tábuas



Fonte: Produção da própria autora.

Nota: (a) Plaina desengrossadeira; (b) Maravalhas

Em seguida, as maravalhas foram espalhadas e expostas ao sol, conforme Figura 10. Com a secagem ao ar livre, a umidade das partículas se estabilizou em aproximadamente 7%.

Figura 10 – Secagem das maravalhas ao ar livre



Fonte: produção da própria autora.

Posteriormente, as maravalhas foram conduzidas em moinho de facas (Figura 11a), com a finalidade de reduzir o tamanho das partículas. Para isso, o equipamento foi montado com uma peneira metálica cuja malha possui abertura igual a 10 mm. A Figura 11b exibe o resultado da trituração das maravalhas.

Figura 11 – Redução das maravalhas



Fonte: produção da própria autora.

Nota: (a) Moinho de facas (b) Partículas reduzidas

4.1.2 Politereftalato de Etileno - PET

O PET utilizado nos painéis é proveniente de garrafas descartáveis e foi fornecido pela Global PET – SA, uma empresa localizada na cidade de São Carlos – SP que realiza a reciclagem de garrafas e desenvolve produtos a partir do material reciclado. O PET foi utilizado no formato em que foi concedido, já triturado, e pode ser visto na Figura 12. O único preparo realizado no material foi a secagem ao ar livre, apenas para garantir a remoção de qualquer umidade excedente.

Figura 12 – PET triturado



Fonte: produção da própria autora.

4.1.3 Resina de Pinus – Breu Colofônia

O Breu Colofônia utilizado neste trabalho foi produzido pelo Grupo RB, uma empresa que produz e comercializa resinas, Breu Colofônia, terebintina e seus derivados. De acordo com as especificações do produto, sua composição é 100% Breu Colofônia proveniente da espécie *Pinus elliotti*.

O Breu Colofônia foi adquirido em formato sólido, com aparência rochosa (Figura 13a) e para ser utilizado precisou ser triturado manualmente, com auxílio de um pilão. A etapa intermediária desse processo e o resultado do Breu Colofônia já triturado são ilustrados nas Figuras 13b e 13c.

Figura 13 – Moagem do Breu Colofônia



Fonte: produção da própria autora.

Nota: (a) Condição inicial (b) Etapa intermediária (c) Breu Colofônia triturado

4.2 METODOLOGIA

Os painéis desta pesquisa foram confeccionados na cidade de Ilha Solteira, no Campus I da Universidade Estadual Paulista (UNESP). As atividades ocorreram no Laboratório Central de Engenharia Civil, pertencente ao Departamento de Engenharia Civil (DEC). Os itens a seguir descrevem os procedimentos envolvidos na produção e avaliação dos painéis.

4.2.1 Composição das misturas

Neste trabalho, foram avaliadas 4 misturas, denominados M1, M2, M3 e M4. Na mistura M1, adotada como referência, não houve adição de PET. Nas demais misturas (M2, M3 e M4), houve substituição de parte da madeira pelo PET, em diferentes proporções, a fim de avaliar a influência do polímero plástico junto ao Breu Colofônia no desempenho dos painéis.

Diversas pesquisas investigaram o uso de adesivos alternativos à ureia-formaldeído na produção de painéis, como o poliuretano derivado de óleo de mamona (Cazella et. al, 2024) e a resina epóxi (Herradon et. al, 2023). Nesses estudos, o teor de resina adotado pelos autores foi variável, indo de 5 a 10% para PUR e de 10 a 15% para epóxi. O teor de adesivo utilizado neste trabalho foi de 20% de Breu Colofônia (em relação ao peso total das partículas secas), superior ao das pesquisas, justamente por se tratar de uma resina natural que ainda é pouco estudada.

A Tabela 5 exibe a porcentagem de cada material utilizado, de acordo com a mistura.

Tabela 5 – Proporção dos materiais em cada mistura

Mistura	<i>Pinus ssp</i> (%)	PET (%)	BREU COLOFÔNIA (%)
M1	100	0	20
M2	75	25	20
M3	50	50	20
M4	25	75	20

Fonte: produção da própria autora.

4.2.2 Determinação da quantidade de material em cada mistura

Para determinar a massa de cada material necessária na confecção dos painéis, adotou-se preliminarmente uma densidade nominal de 0,40g/cm³. Para o cálculo de volume dos painéis, foram consideradas as dimensões de 35x35x1cm, totalizando 1225 cm³ para cada painel.

Assim, o cálculo inicial da densidade dos painéis foi feito a partir da Equação 1, contida na NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

$$D = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Onde:

D = densidade do painel em g/cm³;

m = massa total de maravalhas necessário para produção do painel em g;

v = volume do painel em cm³.

Como resultado, a massa seca das partículas necessária para produção de cada unidade de painel foi equivalente a 490g, sendo, por conveniência, adotado o valor final de 500g.

Para as misturas M2 a M4, em que parte da madeira foi substituída por PET nas proporções de 25%, 50% e 75%, foi utilizado o equivalente a 125g, 250g e 375g de massa seca de PET.

Em cumprimento à normativa brasileira, que exige ao menos 3 amostras de painéis para cada mistura, foram produzidos doze painéis no total. A Tabela 6 traz um resumo da quantidade de material para a confecção de todos os painéis.

Tabela 6 – Quantidade de material utilizado na produção de painéis

Mistura	Pinus(g)	PET (g)	Breu Colofônia (g)	Massa de cada painel (g)	Amostras (un)	Massa total (g)
M1	500	0	100	600	3	1.800
M2	375	125	100	600	3	1.800
M3	250	250	100	600	3	1.800
M4	125	375	100	600	3	1.800

Fonte: produção da própria autora.

4.2.3 Separação dimensional das partículas de Pinus

A separação dimensional das partículas de madeira foi feita com a finalidade de retirar as partículas consideradas muito grandes ou muito finas, selecionando apenas aquelas com tamanho adequado para a produção de aglomerados. Para realizar este procedimento, utilizou-se um agitador de peneiras com malhas de abertura em ordem decrescente de 12,5; 9,52; 6,36; 4,36; 2,36 e 1,19 mm. Na Figura 14 é possível visualizar o equipamento utilizado, onde as partículas foram depositadas e agitadas por 10 minutos.

Figura 14 – Agitador de peneiras



Fonte: produção da própria autora.

Neste processo, as partículas consideradas grandes ficaram retidas nas peneiras de 12,5 e 9,52 mm e não foram aproveitadas. As partículas muito finas (passantes na peneira de 1,19 mm e depositadas no fundo) também foram descartadas. O restante, retido nas peneiras intermediárias (1,19 a 6,36 mm), foi utilizado na confecção dos painéis

4.2.4 Análise da composição granulométrica das partículas

Finalizada a etapa de separação, as partículas de *Pinus* selecionadas foram submetidas ao ensaio de determinação da composição granulométrica, caracterizando-as em função de suas dimensões. Os procedimentos foram norteados pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), realizando-se algumas adaptações para viabilizar o ensaio com materiais não rochosos.

Inicialmente, as partículas de *Pinus ssp* foram secas em estufa até atingirem 0% de umidade. Em seguida, foram retiradas três amostras de aproximadamente 50g cada. Essas amostras foram depositadas individualmente em um agitador de peneiras, configurado no nível quatro de vibração para o tempo de 10 minutos. O agitador de peneiras foi montado com o conjunto das seguintes peneiras: 1/4"; nº4;

nº8; nº16; nº30, nº50 e nº100, cujas aberturas equivalem a 6,30; 4,76; 2,38; 1,19; 0,595; 0,297 e 0,149mm, respectivamente. O equipamento com o conjunto de peneiras pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 – Agitador de peneiras para o ensaio de composição granulométrica



Fonte: produção da própria autora.

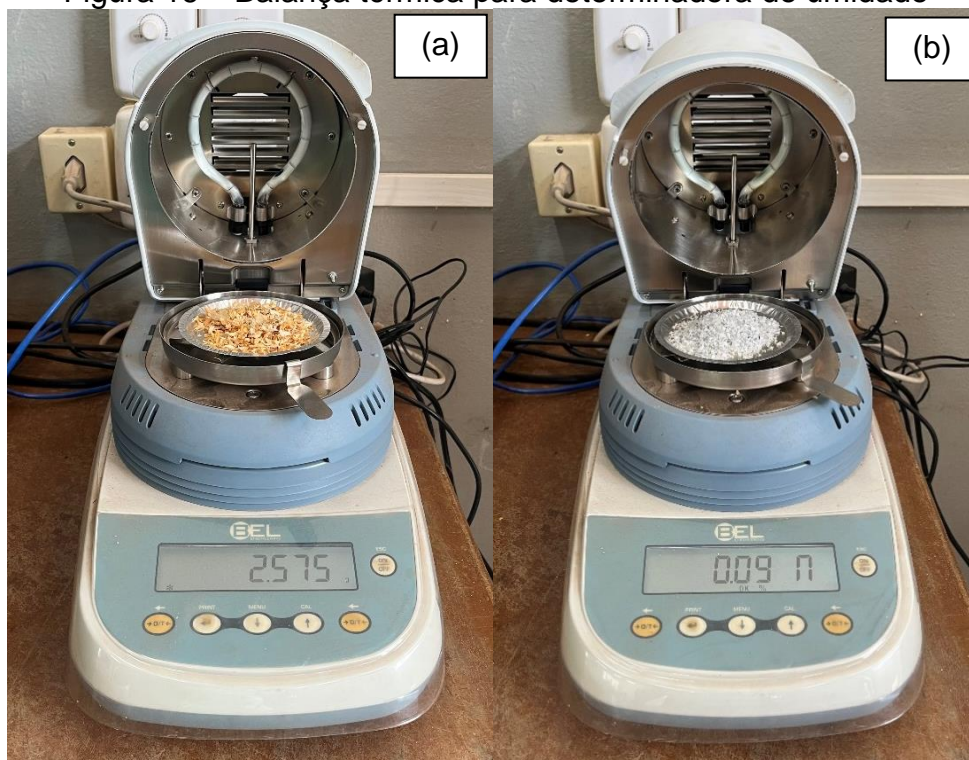
As partículas de PET também foram submetidas à análise de composição granulométrica, sob as mesmas condições citadas anteriormente.

Com este ensaio, identificou-se a quantidade de partículas retidas em cada peneira (em massa e porcentagem), assim como seu valor acumulado (em massa e porcentagem). Também foi possível determinar o módulo de finura, com desvio de 0,01, para averiguar se as partículas estão em conformidade com o tamanho desejável. As perdas não ultrapassaram 0,3%, conforme especificado pela normativa.

4.2.5 Determinação do teor de umidade das partículas

Os teores de umidade das partículas de Pinus e PET foram aferidos utilizando-se uma balança térmica determinadora de umidade por período de dois minutos, as Figuras 16a e 16b ilustram o equipamento utilizado. Inicialmente, a balança fornece a massa da amostra inserida e, na sequência, realiza o aquecimento e secagem do material. Ao final do processo o equipamento forneceu o teor de umidade inicial da amostra.

Figura 16 – Balança térmica para determinadora de umidade



Fonte: produção da própria autora.

Nota: (a) Pesagem inicial do Pinus (b) Teor de umidade final do PET

Para realizar esse procedimento com o PET foram coletadas três amostras e depositadas separadamente na balança térmica, onde foi possível verificar que essas partículas já apresentavam um teor de umidade em torno de 0% (Figura 16b).

Já com as partículas de madeira, que inicialmente apresentavam um teor de umidade em torno de 7%, houve a necessidade de realizar a secagem em estufa. Para isso, o material foi depositado em bandejas e encaminhado ao equipamento à temperatura de $(103 \pm 2) ^\circ\text{C}$, onde permaneceu por período suficiente até atingir uma umidade de aproximadamente 3%. É válido ressaltar que, durante o período de secagem, amostras eram periodicamente conduzidas à balança determinadora de umidade, em intervalos mínimos de duas horas

4.2.6 Produção dos painéis

Para iniciar a produção dos painéis, primeiramente foi necessário pesar os materiais separadamente, nas proporções adequadas para cada mistura, conforme apresentado anteriormente na Tabela 6. Já com as proporções adequadas de pinus,

PET e Breu Colofônia, a mistura foi homogeneizada com auxílio de um tambor rotativo (betoneira), exibido na Figura 17, durante 5 minutos.

Figura 17 – Homogeneização da mistura



Fonte: produção da própria autora.

Em seguida, a mistura foi depositada em uma forma de madeira (Figura 18), com dimensões 35x35 cm, onde o colchão de partículas foi formado. Nela, realizou-se a pré-prensagem a frio do material e, na sequência, o colchão de partículas foi encaminhado à prensa.

Figura 18 – Formadora do colchão de partículas



Fonte: produção da própria autora.

Para conservar as propriedades físicas do PET, um material higroscópico, deve-se garantir que as partículas estejam devidamente secas, sendo recomendada uma temperatura de secagem entre 160°C e 180°C (ABIPET, [entre 2008 e 2024]). Com a prensa ajustada a 160 °C e seguindo os procedimentos adotados por Bispo (2022) e Cazella *et al.* (2024), os painéis foram submetidos a uma força de 61,25 tf (o equivalente a uma pressão de 50 kgf/cm²), por um período inicial de 5 minutos. Em seguida, a pressão foi aliviada por aproximadamente 30 segundos, a fim de realizar a liberação dos gases formados durante a prensagem. Para finalizar o processo, realizou-se a última etapa de prensagem, sob as mesmas condições iniciais, totalizando 10 minutos sob pressão. Nas Figuras 19a e 19b é possível visualizar o colchão de partículas na etapa de prensagem.

Figura 19 – Prensagem do painel



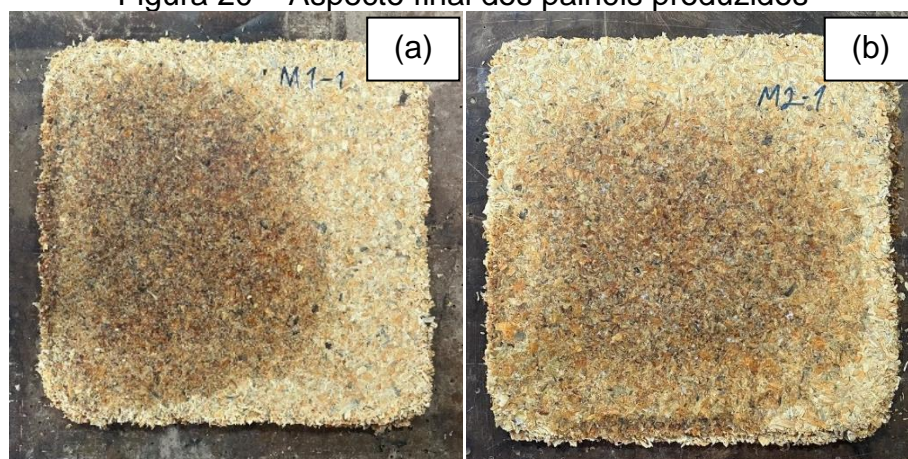
Fonte: produção da própria autora.

Nota: (a) Antes da prensagem (b) Após a prensagem

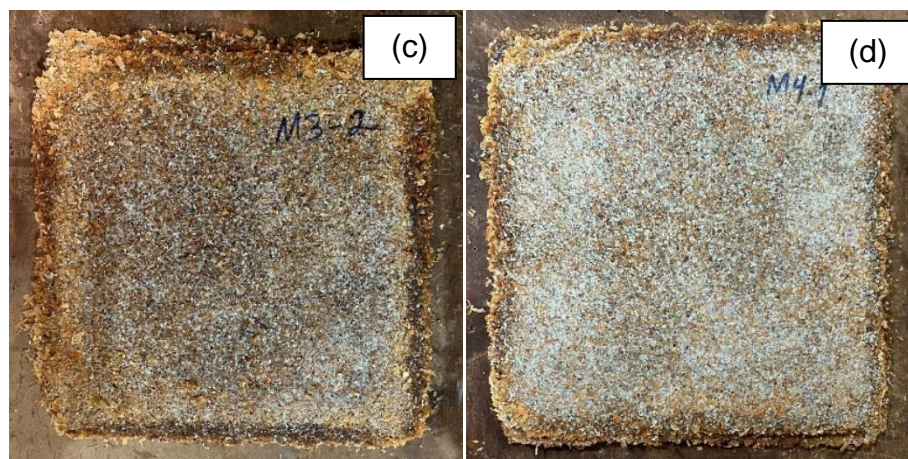
4.2.7 Extração dos corpos de prova

Finalizada a etapa de produção, os painéis foram acomodados em superfície plana à temperatura ambiente, onde permaneceram por 7 dias para finalizar o processo de cura. Na Figura 20, é possível visualizar o aspecto dos painéis produzidos para cada mistura.

Figura 20 – Aspecto final dos painéis produzidos



Nota: (a) Mistura 1 (b) Mistura 2



Fonte: produção da própria autora.

Nota: (c) Mistura 3 (d) Mistura 4

Após esse período, realizou-se o esquadrejamento dos painéis e a extração dos corpos de prova conforme especificado no Anexo A da ABNT NBR 14810-2 (2018) para a realização dos ensaios. A etapa de corte é mostrada na Figura 21.

Figura 21 – Corte dos painéis



Fonte: produção da própria autora.

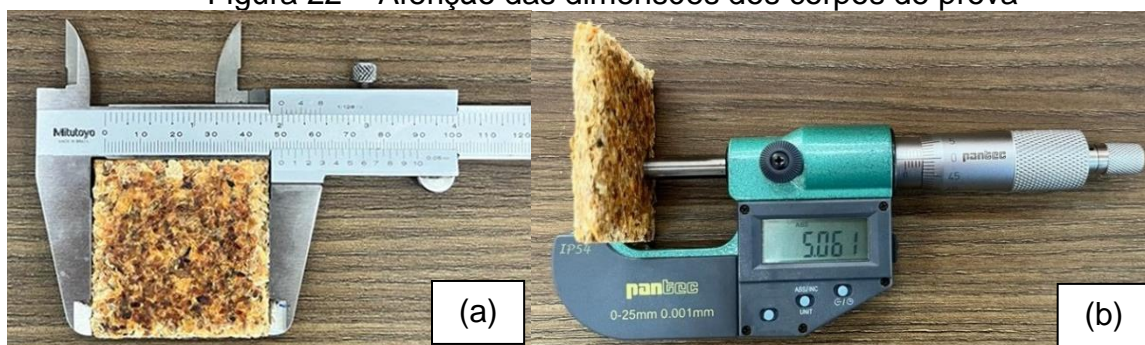
4.2.8 Ensaios físicos

Nesta pesquisa, foram realizados os ensaios físicos para determinação da densidade, do teor de umidade, do inchamento em espessura (Inc-24h) e absorção (Abs-24h) após 24 horas.

4.2.8.1 Densidade

No ensaio de densidade, foi utilizado um paquímetro para aferir o comprimento e a largura de cada corpo de prova e um micrômetro digital para medir a espessura. Esses equipamentos são mostrados nas Figuras 22a e 22b, respectivamente.

Figura 22 – Aferição das dimensões dos corpos de prova

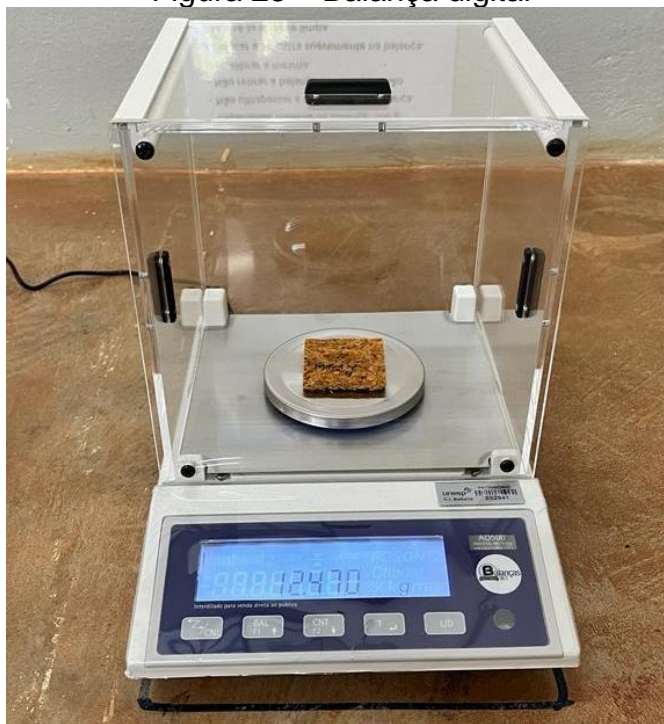


Fonte: produção da própria autora.

Nota: (a) Paquímetro (b) Micrômetro digital

Utilizou-se também uma balança digital (Figura 23) para obtenção da massa de cada corpo de prova.

Figura 23 – Balança digital



Fonte: produção da própria autora.

Ao verificar a massa e as dimensões de todos os corpos de prova, determinou-se o volume de cada um deles e a densidade pôde ser calculada por meio da Equação 1, contida na NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

Após o cálculo da densidade (com precisão de 0,001 g/cm³), determinou-se a densidade média e, por meio da Equação 2, foi possível calcular a variação percentual em relação à densidade média de cada corpo de prova.

$$D_{\%} = \frac{(D - D_m)}{D_m} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

D = densidade do corpo de prova em g/cm³;

$D_{\%}$ = variação da densidade em porcentagem (%);

D_m = densidade média dos corpos de prova de uma mistura, em g/cm³.

4.2.8.2 Teor de umidade

Para determinar o teor de umidade, cada corpo de prova foi pesado para obter a massa na condição inicial (massa úmida). Em seguida, os corpos de prova foram colocados em estufa à temperatura de $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ até sua secagem completa, conforme Figura 24.

Figura 24 – Secagem dos corpos de prova em estufa



Fonte: produção da própria autora.

Por fim, realizou-se novamente a pesagem de cada corpo de prova, obtendo sua massa na condição final do ensaio (massa seca). O cálculo do teor de umidade foi feito com auxílio da Equação 3:

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

Onde:

U = teor de umidade em %;

M_u = massa úmida em g;

M_s = massa seca em g.

4.2.8.3 Inchamento em espessura após 24 horas

Para este ensaio, primeiramente aferiu-se a espessura de cada corpo de prova em sua condição inicial, com auxílio de um micrômetro digital (Figura 22b). Em seguida, os corpos de prova foram acomodados em um recipiente com água deionizada, sob uma lâmina de água de 25 mm, onde permaneceram submersos durante 24 horas. Para evitar o deslocamento dos corpos de prova durante o ensaio, foram utilizados pesos e telas metálicas, conforme a Figura 25.

Figura 25 – Acomodação dos corpos de prova para realizar a submersão



Fonte: produção da própria autora.

Após a submersão de 24 horas, a espessura dos corpos de prova foi aferida novamente, obtendo-se o inchamento em espessura através da Equação 4:

$$I = \frac{E_1 - E_0}{E_0} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

I = inchamento em espessura do corpo de prova, dado em porcentagem (%);

E_1 = espessura do corpo de prova após imersão, dado em mm;

E_0 = espessura do corpo de prova antes da imersão, dado em mm.

4.2.8.4 Absorção após 24 horas

Juntamente com a aferição da espessura para o ensaio de inchamento, realizou-se a pesagem dos corpos de prova para obter sua massa inicial (antes do processo de submersão) e final (após as 24 horas de submersão).

Então, o cálculo da absorção de água após 24 horas foi realizado através da Equação 5:

$$AA = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

AA = absorção de água do corpo de prova, dado em porcentagem (%);

M_1 = massa do corpo de prova após imersão, dado em (g);

M_0 = massa do corpo de prova antes da imersão, dado em (g).

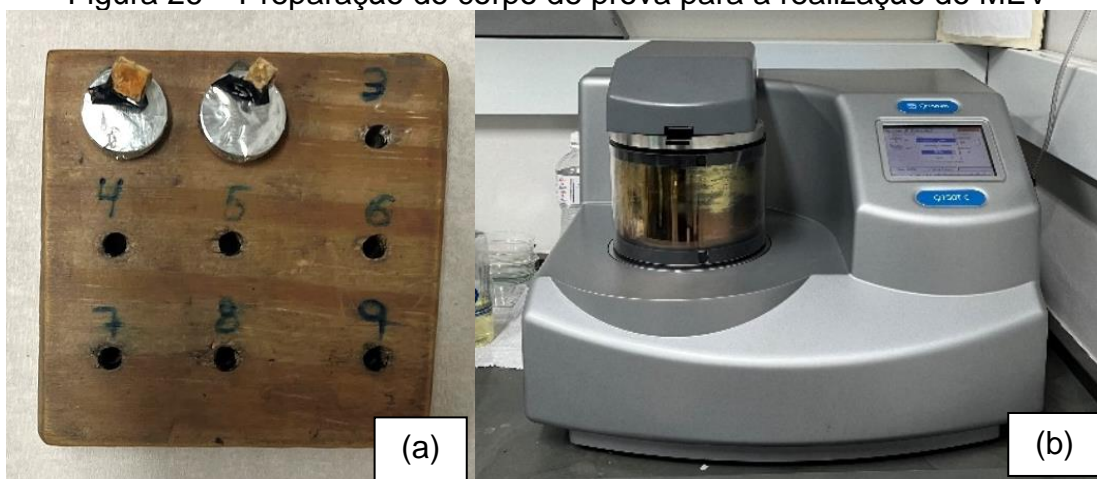
4.2.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

De acordo com o Departamento de Física e Química (DFQ) da UNESP de Ilha Solteira, o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permite realizar análises micro e nanoestruturais de materiais sólidos, identificando os elementos químicos que o compõem e examinando a orientação cristalográfica de qualquer material cristalino. Para isso, são geradas imagens de altíssima resolução (de 2 a 5 nm), com aumento em até 1 milhão de vezes (Moraes, 2023).

O MEV foi realizado para analisar a interação entre os materiais que constituem o painel, possibilitando verificar o grau de eficiência do envelopamento das partículas de Pinus proporcionado pelo Breu Colofônia, na presença ou não de PET.

Para a realização deste ensaio, foram extraídos dois corpos de prova, cada um deles com aproximadamente (5x5x5) mm, provenientes das misturas 1 e 3. Inicialmente, os corpos de prova foram fixados sobre um suporte para serem levados à metalizadora Quarum, modelo Q150TE, onde foi realizado o jateamento de uma fina camada de ouro sobre a superfície a ser analisada. As Figuras 26a e 26b mostram os corpos de prova e o equipamento utilizado.

Figura 26 – Preparação do corpo de prova para a realização do MEV



Fonte: produção da própria autora.

Nota: (a) Corpos de prova de 5x5x5 mm (b) Quorum (Q150TE)

Por fim, os corpos de prova foram levados ao equipamento ZEISS, modelo EVO LS15, mostrado na Figura 27, responsável pela geração das imagens de MEV.

Figura 27– Equipamento ZEISS (modelo LS15)



Fonte: produção da própria autora.

4.2.10 Análise estatística

Para a análise estatística dos resultados, foi realizado o teste de contraste de médias de Tukey, ao nível de 5% de significância. Através dele, avaliou-se a influência do teor de PET em todas as propriedades físicas e mecânicas investigadas.

No teste de Tukey, a letra que acompanha cada resultado denota se o valor médio observado é maior, menor ou estatisticamente equivalente aos demais valores obtidos para aquela propriedade. Assim, a letra "A" corresponde ao maior valor médio, seguido das demais letras em ordem decrescente, enquanto letras iguais indicam resultados médios estatisticamente equivalentes entre as misturas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos em todos os ensaios realizados, físicos e mecânicos, para cada uma das misturas propostas. Além da exposição em tabelas, os resultados são discutidos e comparados aos requisitos da normativa brasileira.

5.1 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

O ensaio de composição granulométrica foi realizado com as partículas de Pinus e PET separadamente. Os resultados deste ensaio com as partículas de madeira estão apresentados na Tabela 7, onde estão apresentadas as quantidades de material retido e acumulado (em grama e porcentagem) em cada peneira utilizada, bem como o módulo de finura.

Tabela 7 – Composição granulométrica do Pinus

Peneira N°	Abertura (mm)	Massa retida (g)	Retido acumulado (g)	Massa retida (%)	Retido acumulado (%)
1/4"	6,360	0,630	0,630	1,26%	1,26%
4	4,750	3,087	3,717	6,18%	7,45%
8	2,360	16,340	20,057	32,74%	40,19%
16	1,190	24,073	44,130	48,24%	88,43%
30	0,595	5,750	49,880	11,52%	99,95%
50	0,297	0,003	49,883	0,01%	99,95%
100	0,149	0,000	49,883	0,00%	99,95%
Fundo		0,023	49,907	0,05%	100,00%
Massa de ensaio (g)		Perdas (g)	Perdas (%)	Módulo de finura	
50,00		0,09	0,19	4,37	

Fonte: produção da própria autora.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 7, percebe-se que houve maior concentração de partículas nas peneiras N°8 e N°16, que abrange um intervalo de 4,74mm a 1,19mm em relação à dimensão das partículas de interesse desse trabalho. Juntas, essas peneiras acumularam 80,98% do material ensaiado.

Os resultados dos ensaios com as partículas de PET são apresentados na Tabela 8, que também exhibe a quantidade de material retido e acumulado (em grama e porcentagem) e o módulo de finura. Vale ressaltar que o PET foi utilizado no formato concedido, sem qualquer processamento ou separação dimensional prévia.

Tabela 8 – Composição granulométrica do PET

Peneira N°	Abertura (mm)	Massa retida (g)	Retido acumulado (g)	Massa retida (%)	Retido acumulado (%)
1/4"	6,360	0,033	0,033	0,07%	0,07%
4	4,750	0,060	0,093	0,12%	0,19%
8	2,360	1,200	1,293	2,41%	2,60%
16	1,190	35,590	36,883	71,41%	74,01%
30	0,595	9,287	46,170	18,63%	92,64%
50	0,297	2,030	48,200	4,07%	96,72%
100	0,149	1,270	49,470	2,55%	99,26%
Fundo		0,367	49,837	0,74%	100,00%
Massa de ensaio (g)		Perdas (g)	Perdas (%)	Módulo de finura	
50,00		0,16	0,33	3,65	

Fonte: produção da própria autora.

Observando a Tabela 8, verifica-se que 90,04% da amostra ensaiada ficaram retidas nas peneiras N°16 e N°30. Isso evidencia que o PET utilizado é predominantemente composto por partículas com dimensões entre 2,35mm e 0,595mm. Comparando as Tabelas 7 e 8, verifica-se que as partículas de Pinus utilizadas apresentam dimensões maiores que as partículas de PET.

5.2 ENSAIOS FÍSICOS

5.2.1 Densidade

Após a obtenção da densidade de todos os corpos de prova, foi possível determinar a densidade média de cada mistura, o coeficiente de variação (CV) e calcular módulo máximo da variação percentual da densidade de cada um dos corpos de prova em relação à densidade média (D%). A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 9 – Densidade média dos painéis

Mistura	Composição	Densidade (kg/m ³)	D (%)	CV (%)
M1	100% Pinus 20% Breu Colofônia	1050,04	4	2,43
M2	75% Pinus / 25% PET 20% Breu Colofônia	1083,00	5	1,93
M3	50% Pinus / 50% PET 20% Breu Colofônia	1093,69	4	2,39
M4	25% Pinus / 75% PET 20% Breu Colofônia	1099,58	6	4,96

Fonte: produção da própria autora.

Pela classificação da ABNT (2018), os painéis devem apresentar densidade entre 551 kg/m³ e 750 kg/m³ para serem considerados painéis de média densidade. Neste estudo, todas as misturas propostas resultaram em painéis com densidade superior a 1000 kg/m³, sendo classificados como painéis de alta densidade.

Uma análise importante se faz através da Tabela 9, onde é possível identificar a interferência do PET na densificação dos painéis, ou seja, à medida em que o Pinus foi sendo substituído pelo polímero, a densidade média dos painéis aumentou.

5.2.2 Teor de umidade

Obtido o teor de umidade de todos os corpos de prova, foi possível determinar o teor de umidade médio de cada mistura e seu respectivo coeficiente de variação (CV). A Tabela 10 apresenta os resultados médios obtidos.

Tabela 10 – Teor de umidade dos painéis

Mistura	Composição	Teor de umidade (%)	CV(%)
M1	100% Pinus 20% Breu Colofônia	5,62	3,38
M2	75% Pinus / 25% PET 20% Breu Colofônia	3,97	9,08
M3	50% Pinus / 50% PET 20% Breu Colofônia	2,73	7,47
M4	25% Pinus / 75% PET 20% Breu Colofônia	1,58	7,84

Fonte: produção da própria autora.

Verifica-se na Tabela 10 que os painéis da mistura M1 se enquadram no intervalo preconizado pela ABNT NBR 14810-2 (2018), que é de 5 a 13% de umidade; vale lembrar que esses painéis foram produzidos com 100% de partículas de Pinus e 20% de Breu Colofônia. Nos valores de umidade determinados para os painéis das demais misturas, verifica-se que todos se encontram abaixo de 5%, sendo que nessas misturas foram propostas adições e variações dos teores de PET, contudo, mantendo-se o teor de Breu Colofônia em 20%. Dessa forma, os valores de umidade determinados evidenciam a eficiência do PET no envelopamento das partículas de madeira, pois, os teores de umidade determinados foram todos inferiores ao intervalo mínimo exigido pela norma brasileira, sendo possível verificar que à medida em que se aumenta o teor de PET, diminui-se o teor de umidade absorvido pelo painel.

5.2.3 *Inchamento em espessura e absorção após 24h*

A Tabela 11 apresenta os resultados médios e o coeficiente de variação (CV) obtido ao final das 24 horas de imersão em água do ensaio de inchamento em espessura.

Tabela 11 – Inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água

Mistura	Composição	I24h (%)	CV (%)
M1	100% Pinus 20% Breu Colofônia	98,58	14,44
M2	75% Pinus / 25% PET 20% Breu Colofônia	38,33	21,27
M3	50% Pinus / 50% PET 20% Breu Colofônia	17,75	30,74
M4	25% Pinus / 75% PET 20% Breu Colofônia	6,42	36,19

Fonte: produção da própria autora.

De acordo com a classificação normativa brasileira P2, é recomendado um percentual de inchamento de no máximo 25% para painéis com espessuras entre 4 e 6 mm. Sendo assim, as misturas 1 e 2 não atenderam a este requisito. Já os painéis das misturas 3 e 4, com 50 e 75% de PET em sua composição, obtiveram um desempenho satisfatório, evidenciando que a incorporação do PET associado a 20% de Breu Colofônia propiciou resistência à percolação da água no interior do painel.

Isso evidencia que o uso conjunto de PET e Breu Colofônia pode melhorar a impermeabilização dos painéis de madeira e conseqüentemente diminuir a percolação de água para o interior dos painéis.

Comportamento semelhante dos painéis também foi verificado no ensaio de absorção de água após 24 horas. A Tabela 12 exhibe os percentuais obtidos.

Tabela 12 – Absorção após 24 horas

Mistura	Composição	A24h (%)	CV (%)
M1	100% Pinus 20% Breu Colofônia	84,55	12,13
M2	75% Pinus / 25% PET 20% Breu Colofônia	39,70	13,33
M3	50% Pinus / 50% PET 20% Breu Colofônia	16,38	20,87
M4	25% Pinus / 75% PET 20% Breu Colofônia	6,17	25,60

Fonte: produção da própria autora.

O aspecto dos corpos de provas antes e depois da realização dos ensaios de inchamento e absorção é ilustrado na Figura 28, antes do corpo de prova entrar em contato com a água e imediatamente após o período de 24 horas de submersão.

Figura 28 – Corpos de prova antes e após 24 horas de submersão em água



(a) M1



(b) M4
Fonte: produção da própria autora.

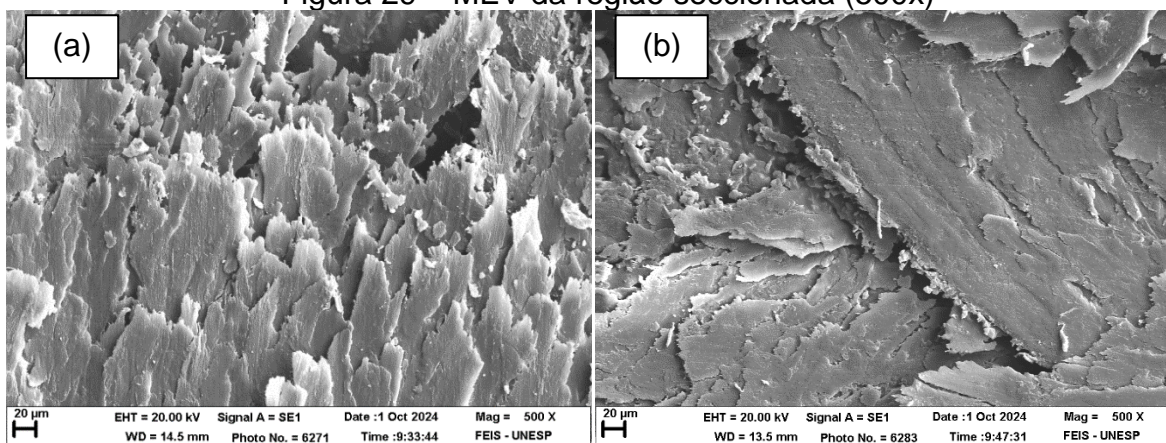
Nos corpos de prova dos painéis da mistura 1 (Figura 28a), a deformação do cp após a realização do ensaio é evidente. Ressalta-se que nessa mistura não foi adicionado PET, resultando em um inchamento significativo e facilmente constatado. Já na mistura 4 (Figura 28b), composta de 75% de PET, 25% de madeira e 20% de Breu Colofônia, o inchamento do painel após a realização do ensaio não foi percebido visualmente, somente através da aferição da espessura com o micrômetro.

5.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Para melhor investigar a interação entre do PET e do Breu Colofônia nas partículas de madeira, realizou-se uma avaliação morfológica através das imagens geradas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

As Figuras 29a e 29b ilustram as regiões dos cps da MEV que foram seccionadas para o ensaio de tração perpendicular, proveniente dos painéis das misturas M1 e M3. Nestas regiões é possível visualizar as partículas de madeira aumentadas em 500 vezes.

Figura 29 – MEV da região seccionada (500x)



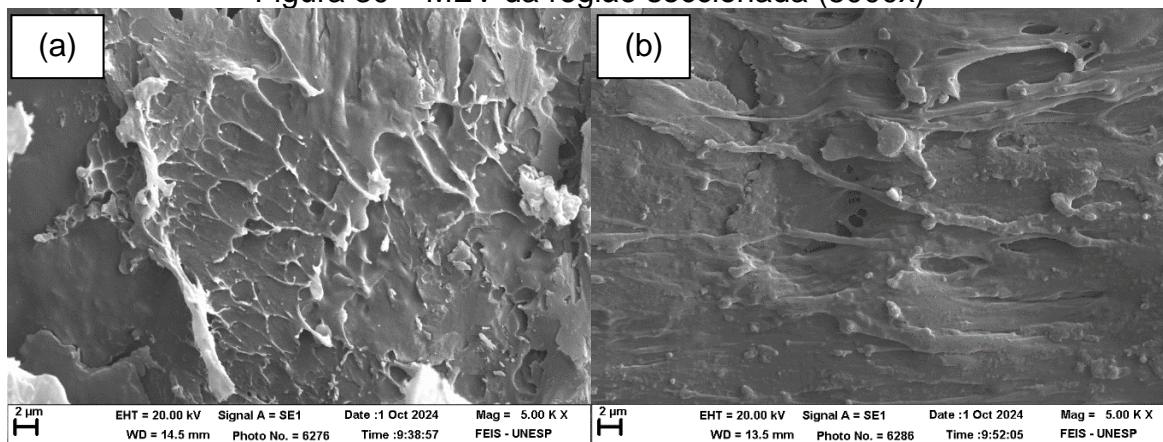
Fonte: produção da própria autora.

Nota: (a) M1 (b) M3

Para os cps dos painéis da Mistura 1 (Figura 29a), produzidos com Breu Colônia e madeira (sem PET), verifica-se a característica do envolvimento do Breu Colônia nas partículas de madeira, ou seja, com bastante vazios, contudo, nos cps dos painéis da Mistura 3 (Figura 29b), produzidos com Breu Colônia, PET e madeira, evidencia-se um maior envolvimento das partículas de madeiras, com menos vazios em comparação com a imagem da Figura 29a, ou seja, certamente esse “envolopamento” é decorrente do processo de produção dos painéis com a resina de Breu Colônia e as partículas de PET.

Considerando aumento de 5.000 vezes nos mesmos cps dos painéis das misturas M1 e M3, a Figura 30 evidencia diferenças entre os cps dos painéis.

Figura 30 – MEV da região seccionada (5000x)



Fonte: produção da própria autora.

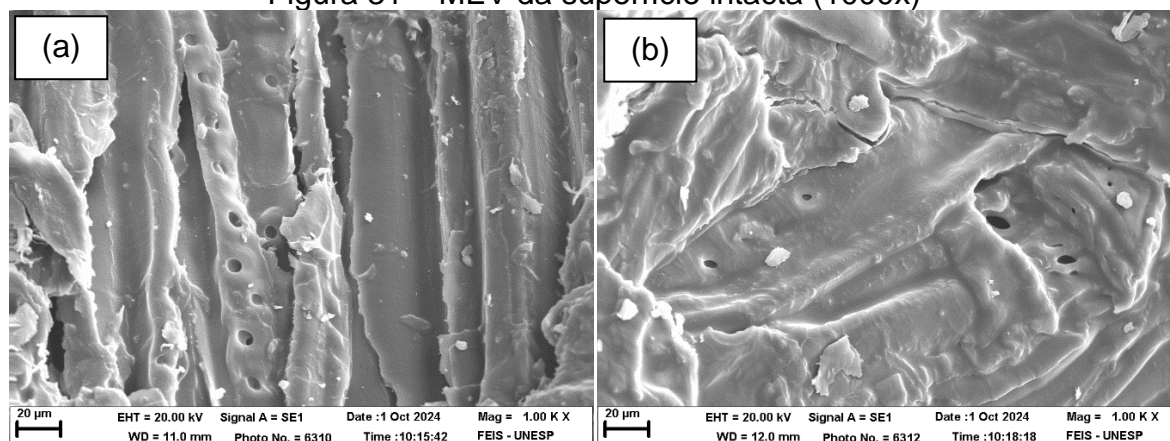
Nota: (a) M1 (b) M3

Com o aumento de 5.000 vezes, verifica-se um maior recobrimento nas partículas de madeira, tanto para os painéis das misturas M1, quanto para os painéis

das misturas M3. Também é possível perceber que, nos painéis das misturas M3, as partículas de madeira estão mais intensamente recobertas que as partículas das misturas M1, formando uma superfície lisa e pastosa, o que nos leva a crer que esse maior recobrimento é decorrente da ação da resina de Breu Colofônia e das partículas de PET derretidas no processo de produção dos painéis. Vale ressaltar que essa característica de recobrimento do PET também foi observada no estudo desenvolvido por Cazella et. al. (2024).

Nas Figuras 31a e 31b estão sendo ilustradas imagens de MEV nos cps referente à superfície externa do painel das misturas M1 e M3, respectivamente. Nessa microscopia foi adotado aumento de 1000x, pois, durante a realização do ensaio este aumento possibilitou identificar estruturas anatômicas características da madeira, os traqueídes e poros.

Figura 31 – MEV da superfície intacta (1000x)



Fonte: produção da própria autora.

Nota: (a) M1 (b) M3

Na imagem da Figura 31a, correspondente aos painéis da mistura M1, estão evidenciados traqueídes e poros, comuns nas madeiras de pinus que estão envelopados pela resina de Breu Colofônia, contudo com sua estrutura básica preservada. Na Figura 35b, correspondente aos painéis da mistura M3, são verificados alguns registros da estrutura básica dos traqueídes e dos poros, que nesse caso estão mais recobertos, certamente pela resina de Breu Colofônia e pelo PET, evidenciando uma significativa diferença entre as duas imagens.

Segundo Frihart; Hunt, 2010, os poros existentes nas madeiras de coníferas são elementos anatômicos importantes para possibilitar a impregnação da resina que possibilitará melhorar a resistência final dos painéis.

Ainda com relação às Figuras 31a e 31b é possível identificar que a superfície de ambas as misturas apresenta um aspecto liso, indicando que a quantidade utilizada de Breu Colofônia conseguiu realizar o recobrimento das partículas. Percebe-se que essa aparência lisa ocorre com maior intensidade na superfície dos painéis da mistura M3 (Figura 35b), o que possibilita inferir sobre a contribuição do PET no envelopamento das partículas, melhorando o desempenho dos painéis da mistura M3 nas propriedades físicas que envolvem a presença de água.

Em relação às propriedades superiores dos painéis da mistura M3, é importante destacar que essa mistura apresenta menor quantidade de partículas de *Pinus ssp* quando comparada aos painéis da mistura M1, contudo, foi mantido o teor de resina de Breu Colofônia em 20% e adotado 50% de PET, isso propiciou o aumento da disponibilidade de aglutinantes para as partículas. Além disso, tanto a resina de Breu Colofônia como o PET com maior disponibilidade propiciaram melhor preenchimento de espaços vazios entre as partículas de madeira, pois, em estudo desenvolvido por Iždinský; Tóth; Kúdela, (2013), a maior disponibilidade de adesivo favoreceu o preenchimento de espaços vazios e melhorou a qualidade e desempenho das propriedades físicas dos painéis.

5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

O teste de Anderson-Darling (5% de significância) em todas as respostas apresentou p-valor (probabilidade p) no intervalo de 0,089 a 0,823, e, por esses serem inferiores ao nível de significância adotado, constata-se a normalidade na distribuição dos resíduos, o que valida os resultados obtidos do teste de contraste de média de Tukey.

Nas Tabela 13 são apresentados os valores médios (X_m) e os coeficientes de variação (CV) das propriedades físicas das quatro composições (misturas) estipuladas na produção dos painéis, bem como os resultados do teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância) acerca da influência dos teores de madeira de *Pinus* e PET investigado nas propriedades avaliadas.

Tabela 13 – Análise estatística das propriedades físicas dos painéis fabricados com 20% de resina de Breu Colofônia.

Mistura	Estat.	ρ (kg/m ³)	TU (%)	Inc-24h (%)	Abs-24h (%)
M1	X _m	1050,04 (B)	5,62 (A)	98,58 (A)	84,55 (A)
	CV (%)	2,43	3,38	14,44	12,13
M2	X _m	1083,00 (A)	3,97 (B)	38,33 (B)	39,70 (B)
	CV (%)	1,93	9,08	21,27	13,33
M3	X _m	1093,69 (A)	2,73 (C)	17,75 (C)	16,38 (C)
	CV (%)	2,39	7,47	30,74	20,87
M4	X _m	1099,58 (A)	1,58 (D)	6,42 (D)	6,17 (D)
	CV (%)	4,96	7,84	36,19	25,60

Fonte produção da própria autora.

A Tabela 13 permitiu identificar que quanto maior o teor de PET, maior a densidade dos painéis, sendo a mistura M4 (composta de 75% de PET) a que obteve o maior valor médio. No entanto, apesar da densificação ocorrida, a análise estatística mostra que essa variação não foi estatisticamente significante entre as misturas que contêm PET.

Em contrapartida, verificou-se que o teor de umidade diminuiu à medida que o PET foi incorporado. De acordo com o teste de Tukey, essa variação entre as misturas foi significante.

Para as propriedades de inchamento em espessura (Inc-24h) e absorção (Abs-24h), o comportamento foi semelhante ao teor de umidade, ou seja, à medida que o PET foi incorporado, melhorou o desempenho obtido pelo painel. Essa variação entre as misturas foi considerada significativa pela análise estatística, confirmando a importância da incorporação do resíduo plástico.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, a utilização do Breu Colofônia somado ao aumento da incorporação de PET para produção dos painéis aglomerados propiciou melhorias nas propriedades físicas avaliadas. Ainda, considerando os requisitos exigidos pela ABNT NBR 14810-2 (2018), verificou-se que os painéis das misturas M3 e M4 apresentaram desempenho satisfatório para as propriedades de Inc-24h e Abs-24h, evidenciando que o incremento do PET em associação a 20% de Breu Colofônia constitui uma boa alternativa para painéis em condições de exposição à umidade.

Embora a utilização do Breu Colofônia como adesivo alternativo em painéis de madeira seja uma aplicação pouco estudada, os resultados verificaram a potencialidade dessa aplicação, com a vantagem do Breu Colofônia se tratar de um material natural, proveniente de fonte renovável.

Um importante entendimento sobre o desenvolvimento desse estudo e das análises realizadas se constitui na real possibilidade de se utilizar o Breu Colofônia e o PET reciclado, pois ficou evidente que o comportamento desses dois componentes nas misturas com partículas de madeira pode propiciar bons resultados para as propriedades dos painéis. Para melhor compreender a interação do PET e do Breu Colofônia com as partículas de madeira, realizou-se uma avaliação morfológica dos painéis através de imagens de MEV, permitindo identificar um bom recobrimento das partículas de madeira, principalmente com a presença no PET. Ainda, as imagens sugerem que o teor com 20% de Breu Colofônia adotado possa ser reajustado, possibilitando uma diminuição no consumo dessa resina natural.

Dessa forma, para futuros trabalhos, propõe-se a produção de painéis adotando diferentes proporções de madeira e PET, reajustando o teor de Breu Colofônia, modificando alguns parâmetros de prensagem e avaliando também as propriedades mecânicas dos painéis.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, E. da S. *et al.* Evolução do mercado de painéis MDF e MDP. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 158, 2019. Disponível em: http://www.remade.com.br/revistadamadeira/edicoes/ed_158/005.html. Acesso em: 09 nov. 2023.
- ASCI, T.; KUCUKTUVEK, M.; KESKIN, H. Increasing the fire resistance of particleboard used in architecture with colophony doped boron compounds. **Journal of Polytechnic**, Ankara, v. 25, n.3, p. 1157-1165, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET – ABIPET. **12º Censo da Reciclagem do PET no Brasil**. São Paulo: ABIPET, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET – ABIPET. **História da embalagem PET**. São Paulo: ABIPET, [20--?]. Disponível em: <https://abipet.org.br/historia-da-embalagem-pet/>. Acesso em: 01 mar. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET – ABIPET. **Embalagem**. São Paulo: ABIPET, [entre 2008 e 2024]. Disponível em: <https://abipet.org.br/embalagem/>. Acesso em: 01 mar. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14810-1**: painéis de partículas de média densidade: parte 1: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14810-2**: painéis de partículas de média densidade: parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 371-380, 2003
- BISPO, R. A. *et al.* Production and evaluation of particleboards made of coconut fibers, pine, and eucalyptus using bicomponent polyurethane-castor oil resin. **BioResources**, Raleigh, v. 17, p. 3944-3951, 2022.
- BRITO, J. O. *et al.* Resinagem e qualidade de resinas de pinheiros tropicais: comparações entre espécies e época de resinagem. **IPEF**, Piracicaba, n. 35, 1978. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr036.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2024.

BUZO, A. L. S. C. *et al.* Painéis de pínus e bagaço de cana empregando-se dois adesivos para uso na construção civil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 183-193, 2019.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAZELLA, P. H. da S. *et al.* Polyethylene terephthalate (PET) as a recycled raw material for particleboards produced from pinus wood and biopolymer resin. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 447, 2024.

COPPEN, J. J. W.; HONE, G. A. **Gum naval stores**: turpentine and rosin from pine resin. Rome: FAO, 1995.

FEITOSA, B. da C. Aproveitamento econômico dos resíduos de madeira. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 132, 2012. Disponível em: https://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1626&subject=Res%EDduos&title=Aproveitamento%20econ%F4mico%20dos%20res%EDduos%20de%20madeira. Acesso em: 05 nov. 2023.

FONSECA, S. M.; KAGEYAMA, P. Y. Melhoramento genético face à produção de resina. **IPEF**, Piracicaba, n. 36, 1978. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr036.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Forestry Production and Trade**: Particleboard. Rome: FAO, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO/visualize>. Acesso em: 10 nov. 2023

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Global Forest Resources Assessment 2020**: Main report. Rome: FAO, 2020.

FRIHART, C. R., HUNT, C. G. Adhesives with wood materials: bond formation and performance. *In*: ROSS, Robert. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison, WI: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. 24 p. chapter 10.

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

GURGEL, O. A.; FARIA, A. J. Fatores que influem na resinagem de Pinus. **IPEF**, Piracicaba, n. 37, 1978. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr037.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2024.

HEINRICH BÖLL STIFTUNG (org.). **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/2020-11/Atlas%20do%20PI%3%A1stico%20-%20vers%3%A3o%20digital%20-%2030%20de%20novembro%20de%202020.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2024.

HERRADON, M. P., *et al.* Produção e avaliação de painéis de partículas com resíduo de *Pinus oocarpa* aglutinadas com dois tipos de resinas. **Caderno Pedagógico**, Curitiba, v. 20, n. 4, p. 889-902, 2023.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Programa Setorial da Qualidade de Painéis de Madeira MDF e MDP**. São Paulo: IBÁ, 2017. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/outros/informativo-xx.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2024.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Manual de Uso e Manutenção de Painéis de Madeira MDP e MDF**. São Paulo: IBÁ 2021.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório Anual**. São Paulo: IBÁ, 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2023.

INDÚSTRIAS QUÍMICAS CARBOMAFRA S.A. O *Pinus elliottii*: a goma resina e seus derivados. **IPEF**, Piracicaba, n. 38, 1978. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr038.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2024.

IWAKIRI, S. **A influência das variáveis de processamento sobre propriedades das chapas de partículas de diferentes espécies de *Pinus***. 1989. 130 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

IWAKIRI, S. *et al.* **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005.

IWAKIRI, S. *et al.* Produção de chapas de madeira aglomerada. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 99, 2006. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=967&subject=Pain n. Acesso em: 05 nov. 2023.

IWAKIRI, S. *et al.* Produção de chapas de madeira aglomerada de cinco espécies de pinus tropicais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 8, n. 1, p.137-142, 2001. Disponível em: <https://www.floram.org/article/588e21f9e710ab87018b45c7/pdf/floram-8-%C3%BAnico-137.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2023

IŽDINSKÝ, J.; TÓTH, V. KÚDELA, J. Polyethylene terephthalate recycling in particleboard production. **Arbora Publishers**, Zvolen, p.93-97, 2013.

KELLY, M. W. **Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard**. Madison: USDA, 1977.

MARTO, G. B. T. Indicações para escolha de espécies de pinus. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 119, 2006. Disponível em: https://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=953&subject=Aplicação&title=Indicação%20para%20escolha%20de%20espécies%20de%20Pinus. Acesso em: 07 jan. 2024.

MICHAELI, W. *et al.* **Tecnologia dos plásticos**. 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1995.

MIGLIORINI, A. J.; BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Qualidade da resina de espécies de pinus implantadas no estado de Minas Gerais: análise do breu e terebentina. **IPEF**, Piracicaba, n. 105, 1980. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr105.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2024.

MORAES, J. C. S. **LaMIS** - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Ilha Solteira, 2023. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/fisica-e-quimica/prestacao-de-servicos/mev/apresentacao/>. Acesso em: 05 nov. 2024.

NAKANISHI, E. Y. *et al.* Latex and rosin films as alternative waterproofing coatings for 3-layer sugarcane-bamboo-based particleboards. **Polymer Testing**, London, v. 75, p. 284-290, 2019.

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

NEVES, G. A. *et al.* Resinas: Aproveitamento do pinus resinoso. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 99, 2006. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=964&subject=Resinas&title=Aproveitamento do pinus resinoso. Acesso em: 21 fev. 2024.

OLIVEIRA, F. L. de *et al.* Propriedades da madeira de Pinus taeda L. em função da idade e da posição radial na tora. **Revista Instituto Florestal**, São Paulo, v. 18, n. único, p. 59-70, 2006.

PASTL, Carolina. **Extração de renda na floresta**. Porto Alegre: Correio do povo, 2021. Disponível em: <https://www.correiodopovo.com.br/extra%C3%A7%C3%A3o-de-renda-na-floresta-1.673577>. Acesso em: 05 nov. 2024.

RAZERA, D. L. **Estudo sobre as interações entre as variáveis do processo de produção de painéis aglomerados e produtos moldados de madeira**. 2006. 157 f. Dissertação (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

RIBAS, C. **Resinagem de Pinus**. São Paulo: Instituto Florestal, 2002. Série informativa.

RODRIGUES, F. R. *et al.* Produção de painéis de partículas de madeira com inclusão de poliestireno. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 33, p. 1-22, 2023.

ROQUE, C. A. L.; VALENÇA, A. C. V. Painéis de madeira aglomerada. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 8, p. 153-170.

SCHAPPO, J. A. Destilação da resina de Pinus elliottii, rendimentos, análises e aplicação de seus derivados. *In*: CONVENÇÃO ANUAL DA ABCP, 6., 1973, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ABCTP, 1973. p. 239-244.

SELBO, M. L. **Adhesive bonding of wood**. Washington, D.C: Department of Agriculture, 1975.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Facts About Formaldehyde**. Washington, DC: EPA, 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/formaldehyde/facts-about-formaldehyde>. Acesso em: 05 mai. 2024.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. da. Panorama de mercado: painéis de madeira. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 40, p. 323-384, set. 2014.

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	FRANCIELI ARALDI DE CARVALHO 11/06/1997
Nacionalidade	brasileira
Nome em citações bibliográficas:	de Carvalho, F. A. Carvalho, F. A.
Currículo Lattes	http://lattes.cnpq.br/2936227243464349
ORCID	https://orcid.org/0000-0003-1000-7057
Outro identificador	
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2015/2020	Bacharelado em Engenharia Civil Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP
2022/2024	Pós-graduação em Processos didáticos pedagógicos para cursos na modalidade a distância Universidade Virtual do Estado de São Paulo - UNIVESP

PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA
<p>Herradon, M. P., Santos Junior, A. J., de Carvalho, F. A., de Souza, M. V., Cazella, P. H. da S., Rodrigues, F. R., Bispo, R. A., da Silva, S. A. M., & Christoforo, A. L. (2023). Produção e avaliação de painéis de partículas com resíduo de <i>Pinus oocarpa</i> aglutinadas com dois tipos de resinas. Caderno Pedagógico, 20(4), 889–902. DOI: 10.54033/cadpedv20n4-025</p> <p>de Carvalho, F. A., Rodrigues, F. R., Dezen, L. E., de Souza, M. V., Santos Junior, A. J., dos Santos, H. F., Christoforo, A. L. (2025). Eco-friendly Particleboard Production: Integrating Recycled PET and Bio-based Pine Resin Adhesives. BioResources, 20(2), 3443–3452. DOI:10.15376/biores.20.2.3443-3452</p>
PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES
Bancas de trabalhos de conclusão
.
Orientações
PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS