

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

ANTONIO JOSÉ SANTOS JUNIOR

**AVALIAÇÃO DE PAINÉIS AGLOMERADOS HOMOGÊNEOS DE PINUS AGLUTI-
NADOS COM ADESIVO EPÓXI**

Ilha Solteira
2024

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANTONIO JOSÉ SANTOS JUNIOR

AVALIAÇÃO DE PAINÉIS AGLOMERADOS HOMOGÊNEOS DE PINUS AGLUTINADOS COM ADESIVO EPÓXI

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

Prof. Dr. Sérgio Augusto Mello da Silva
Orientador

Ilha Solteira
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S237a Santos Junior, Antonio José.
Avaliação de painéis aglomerados homogêneos de pinus aglutinados com adesivo epóxi / Antonio José Santos Junior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
93 f. : il.

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

Orientador: Sergio Augusto Mello da Silva

Inclui bibliografia

1. Painéis aglomerados. 2. Pinus. 3. Resina epóxi.


Amanda Sertori dos Santos

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

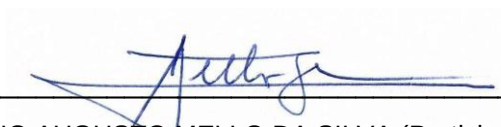
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: "Avaliação de painéis aglomerados homogêneos de pinus aglutinados com adesivo Epóxi"

AUTOR: ANTONIO JOSÉ SANTOS JÚNIOR

ORIENTADOR: SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA

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

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Sergio", is positioned above a horizontal line.

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

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

Prof. Dr. ALEXSANDRO DOS SANTOS FELIPE (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia - UNESP

Ilha Solteira, 19 de junho de 2024

IMPACTO POTENCIAL DESSA PESQUISA

Esta pesquisa tem como objetivo utilizar resíduos de madeira para a fabricação de painéis aglomerados, substituindo o adesivo ureia-formaldeído, conhecido por seus danos à saúde e ao meio ambiente. Esta iniciativa apoia o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 12, que promove consumo e produção sustentáveis, incentivando a reutilização de materiais e a redução de resíduos. Além disso, está alinhada com o ODS 3, que visa garantir saúde e bem-estar, e com o ODS 13, que combate o aquecimento global ao reduzir a emissão de substâncias nocivas. Portanto, os resultados da pesquisa destacam a necessidade de a indústria de materiais de construção adotar métodos mais inovadores e sustentáveis.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research aims to use wood wastes for the manufacture of clustered panels, replacing the urea-formaldehyde adhesive, known for its harm to health and the environment. This initiative supports Sustainable Development Goal (SDG) 12, which promotes sustainable consumption and production by encouraging the reuse of materials and the reduction of waste. Furthermore, it is aligned with SDG 3, which aims to ensure health and well-being, and SDG 13, which fights global warming by reducing emissions of harmful substances. Therefore, the research results highlight the need for the building materials industry to adopt more innovative and sustainable methods.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais, Antonio e Sonia, e a minha irmã Larissa, pelo apoio incondicional durante toda essa trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Antonio José Santos e a minha mãe Sonia Aparecida Souza Santos, por me permitirem sonhar e poder alcançar essa conquista que também é deles.

À minha irmã, que de certa forma ajudou a formar o meu caráter, me transformando em quem sou hoje.

À toda a minha família, tios, tias, primos e primas, cunhado, que sempre depositaram muita confiança em mim.

À minha namorada Laíssa, que esteve presente desde quando surgiu a ideia de cursar um mestrado, me apoiando não só nessa, como em todas as decisões, sempre com muito amor, carinho e companheirismo.

Ao meu orientador Sergio Augusto Mello da Silva, por toda a orientação, ensinamentos, companheirismo e pelo amigo que acabou se tornando no decorrer da minha trajetória.

A minha companheira de pesquisa Marjorie, por ter compartilhado praticamente todos os momentos durante o mestrado, desde quando nos conhecemos pela primeira vez durante as aulas ao vivo, até nos momentos finais quando pude acompanhar você concluindo o seu sonho. Vou guardar para sempre os momentos de alegria e os de quebra cabeça que tivemos diante dos desafios.

Ao meu amigo Reginaldo que não só foi meu porto seguro na vida acadêmica de Ilha Solteira, mas também foi um companheiro extremamente importante.

Ao meu amigo Matheus que me introduziu nessa vida acadêmica, pelos ensinamentos e pela confiança depositada em mim.

A minha amiga Denise, que acabou se tornando uma amizade importante, e me permitindo sonhar cada vez mais esse sonho.

Aos amigos que pude fazer em toda a trajetória acadêmica, Felipe, Rodrigo, Lucas, Francielli, Vitória, e a todos os outros que tiveram parte nesse caminho.

Ao professor André que acabou se tornando um grande amigo e companheiro, agradeço pelos ensinamentos e por toda a confiança depositada.

Aos professores da pós-graduação da FEIS – UNESP, que me acrescentaram conhecimento na jornada pelo mestrado.

Aos técnicos do laboratório de engenharia civil Flávio e Gilson, que me ajudaram na produção dos painéis e proporcionaram diversos ensinamentos da área técnica.

Ao funcionário Luiz da Marcenaria da UNESP, por todos os serviços realizados sempre com muita dedicação e simpatia.

Ao técnico Elton do laboratório do Departamento de Física e Química – DFQ por executar os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” UNESP Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira FEIS por me conceder a oportunidade de desenvolver minha pesquisa e proporcionar ensinamentos.

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

Ao Departamento de Engenharia Civil – DEC e a todos os servidores.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado, importante auxílio para o desenvolvimento da pesquisa. Agradeço a todos que auxiliaram direta ou indiretamente à produção deste trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

A construção civil e a indústria moveleira são essenciais para o progresso socioeconômico, mas apresentam desafios ambientais e de saúde devido ao desperdício, exploração de recursos e gestão inadequada de resíduos. Dentro desse contexto, a utilização de materiais alternativos e pouco explorados pode ser útil para abordar parcialmente essa questão. Este estudo tem como objetivo avaliar a influência de um novo adesivo, o epóxi, que ainda não foi usualmente explorado na produção de painéis aglomerados de madeira, comparando-o na literatura com outros adesivos, como a Ureia-Formaldeído (UF) que é amplamente utilizada na indústria. As partículas de madeira utilizadas foram de Pinus com teor de umidade abaixo de 5% e granulometria variando entre 1,16 e 4,76 mm, utilizando como aglomerante a resina epóxi. Três misturas de adesivo foram preparadas em proporções de 5%, 10% e 15%, resultando em três painéis produzidos para cada mistura. A densidade nominal dos painéis foi estabelecida em 0,5 g/cm³. Eles foram fabricados sob uma pressão de 5 MPa, com um tempo de prensagem de 10 minutos e a uma temperatura de 110°C, parâmetros estabelecidos através de testes preliminares e literatura. As propriedades físicas e mecânicas foram avaliadas de acordo com a ABNT NBR 14810-2. Os resultados revelaram um potencial significativo na aplicação da Resina Epóxi, em alguns casos superando as expectativas da literatura. As avaliações da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) comprovam que 5% de adesivo não é uma porcentagem suficiente para o recobrimento das partículas. Especificamente, a mistura contendo 15% de Epóxi alcançou a classificação P4 conforme estipulado pela norma, destacando-se como uma opção promissora.

Palavras-chave: painéis aglomerados; pinus; resina epóxi.

ABSTRACT

Construction and the furniture industry are essential for socio-economic progress, but present environmental and health challenges due to waste, resource exploitation and inadequate waste management. In this context, the use of alternative and under-exploited materials may be useful in addressing this issue in part. This study aims to assess the influence of a new adhesive, epoxy, which has not yet been commonly explored in the production of wood cluster panels, comparing it in the literature with other adhesives, such as Urea-Formaldehyde (UF) which is widely used in industry. The wood particles used were Pinus with a moisture content of less than 5% and granulometry ranging between 1.16 and 4.76 mm, using epoxy resin as a cluster. Three adhesive mixtures were prepared in proportions of 5%, 10% and 15%, resulting in three panels produced for each mixture. The nominal density of the panels was set at 0.5 g/cm³. They were manufactured under a pressure of 5 MPa, with a pressing time of 10 minutes and a temperature of 110°C, parameters established through preliminary tests and literature. The physical and mechanical properties were evaluated according to ABNT NBR 14810-2. The results revealed a significant potential in the application of Epoxy Resin, in some cases exceeding the expectations of the literature. Scanning Electron Microscopy (SEM) prove that 5% adhesive is not a sufficient percentage for particle coating. Specifically, the mixture containing 15% Epoxy reached the P4 classification as stipulated by the standard, standing out as a promising option.

Keywords: particleboard; pinus; epoxy resin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição global das florestas	24
Figura 2 - Distribuição dos estados brasileiros de acordo com o plantio de Pínus....	26
Figura 3 - Representação dos compostos de madeira.....	28
Figura 4 - Distribuição das partículas dos painéis aglomerados	30
Figura 5 - Volume de importações dos painéis aglomerados.....	32
Figura 6 - Volume de exportações de painéis aglomerados	32
Figura 7 - Principais produções mundiais de painéis de madeira (milhões de m³)....	33
Figura 8 - Vendas domésticas de painéis de madeira (milhões de m³).....	34
Figura 9 - Fluxograma da fabricação dos painéis aglomerados	35
Figura 10 - Forma molecular da resina epóxi	41
Figura 11 - Adesivo Epóxi	48
Figura 12 - Painel aglomerado (a) 10% de PUR (b) 10% de Epóxi.....	49
Figura 13 - - (a) plaina desengrossadeira, (b) moinho de facas, (c) agitador de peneiras mecânico.....	50
Figura 14 - Determinação da composição granulométrica	51
Figura 15 - Secagem das partículas.....	52
Figura 16 - Balança Determinadora de Umidade	52
Figura 17 - Material Ensaiado no balão volumétrico	53
Figura 18 - Calibração do picnômetro ao fluido.....	54
Figura 19 - (a) homogeneização da resina com endurecedor, (b) homogeneização do adesivo manualmente, (c) homogeneização em tambor giratório	57
Figura 20 - (a) material depositado na prensa, (b) quadro de controle de temperatura	58
Figura 21 - Painel Epóxi	58
Figura 22 - (a) aferição da espessura do cp, (b) aferição das medidas das arestas do cp	60
Figura 23 - (a) Aferição da espessura inicial, (b) cps submersos em água deionizada, (c) aferição da espessura final	62
Figura 24 - Ensaio de flexão estática	65
Figura 25 - Lixadeira para regularização das faces dos cps	66
Figura 26 - Preparação do corpo metálico (a), (b) e (c)	67
Figura 27 - Cola utilizada para colar o cp ao suporte metálico.....	67

Figura 28 - (a) máquina universal de ensaios EMIC, (b) cp ao fim do estágio do ensaio de TP.....	68
Figura 29 - Densidade média dos painéis	74
Figura 30 - cps após o ensaio de Inchamento e absorção 24h	75
Figura 31 - Inchamento em espessura 24h e Absorção após 24h	75
Figura 32 - Teor de umidade médio dos painéis	77
Figura 33 - Valores médios de MOR	79
Figura 34 - Valores médios de MOE	80
Figura 35 - Valores médios de TP	81
Figura 36 - Imagens de MEV das misturas	83
Figura 37 - Imagens de MEV da interface entre o epóxi e as partículas	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nomenclatura e valores médios de massa específica aparente do gênero Pinus	26
Tabela 2 - Valores mínimos das propriedades físicas e mecânicas informados	39
Tabela 3 - Resultados obtidos da literatura para painéis de Pinus e UF	45
Tabela 4 - Misturas propostas para confecção dos painéis	49
Tabela 5 - Teor de umidade das partículas de Pinus	70
Tabela 6 - Massa específica das partículas	70
Tabela 7 - Índice de compactação das misturas	71
Tabela 8 - Resultados do ensaio granulométrico	72
Tabela 9 - Análise estatística e propriedades físicas dos painéis	73
Tabela 10 - Comparativo dos resultados físicos com a literatura de Pinus e UF	77
Tabela 11 - Análise estatística e propriedades mecânica dos painéis	78
Tabela 12 - Comparativo dos resultados mecânicos com a literatura de Pinus e UF	82
Tabela 13 - Parâmetros físicos e mecânicos da ABNT NBR 14810-2 (2018)	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	19
2	OBJETIVOS	22
2.1	OBJETIVO GERAL	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	23
3.1	PANORAMA DO SETOR FLORESTAL.....	23
3.2	MADEIRA DE PINUS.....	25
3.3	PAINÉIS AGLOMERADOS DE MADEIRA	27
3.3.1	Histórico	27
3.3.2	Aspectos gerais dos painéis aglomerados	28
3.3.3	Mercado internacional dos painéis aglomerados.....	31
3.3.4	Setor econômico brasileiro envolvendo a produção de painéis	33
3.3.5	Fabricação industrial e produção de painéis aglomerados.....	34
3.3.6	Fatores que influenciam nas propriedades dos painéis aglomerados..	36
3.3.7	Requisitos normativos de painéis aglomerados	39
3.4	ADESIVO	39
3.4.1	Epóxi.....	40
3.5	PAINÉIS AGLOMERADOS E ADESIVOS	42
3.5.1	Painéis aglomerados de pinus e adesivo convencional a base de ureia formaldeído.....	42
3.5.2	Painéis aglomerados de pinus e adesivo epóxi.....	45
3.6	CONCLUSÕES DA REVISÃO	46
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS PARA PRODUÇÃO DOS PAINÉIS	47
4.1.1	Pinus.....	47
4.1.2	Adesivo Epóxi.....	47
4.2	METODOLOGIA	48

4.2.1	Estudo exploratório.....	48
4.2.2	Definição dos tratamentos.....	49
4.2.3	Produção das partículas.....	50
4.2.4	Composição granulométrica.....	51
4.2.5	Umidade das partículas.....	52
4.2.6	Massa específica das partículas.....	53
4.2.7	Razão de compactação.....	55
4.2.8	Cálculo da massa de partículas dos painéis.....	55
4.2.9	Produção dos painéis.....	56
4.2.10	Preparação dos corpos de provas.....	58
4.3	ENSAIOS FÍSICOS.....	59
4.3.1	Densidade (D).....	59
4.3.2	Teor de umidade (U).....	61
4.3.3	Inchamento em espessura 24h (I) e Absorção após 24h (A).....	62
4.4	ENSAIOS MECÂNICOS.....	63
4.4.1	Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE) 64	
4.4.2	Resistência à Tração Perpendicular (TP).....	66
4.5	MICROSCOPIA ELETÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	68
4.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.....	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	70
5.1	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS.....	70
5.1.1	Teor de umidade das partículas.....	70
5.1.2	Massa específica das partículas.....	70
5.1.3	Razão de compactação.....	71
5.1.4	Determinação granulométrica.....	71
5.2	ENSAIOS FÍSICOS.....	73
5.3	ENSAIOS MECÂNICOS.....	78
5.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	83

5.5	CLASSIFICAÇÃO DE ACORDO COM A ABNT NBR 14810-2 (2018)	85
6	CONCLUSÕES.....	87
	REFERÊNCIAS.....	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O ramo da construção civil tem, historicamente, uma enorme relevância e um papel fundamental para o desenvolvimento do Brasil e, para estas finalidades, ela está entre as principais consumidoras de recursos naturais. Segundo dados do IBGE (2022), no PAIC (Pesquisa Anual da Indústria da Construção) o ramo da construção civil chegou a 2 milhões de pessoas empregadas em 2020, dentre essas, 131,8 mil empresas ativas geraram R\$ 325,1 bilhões em valor de incorporações, obras e/ou serviços da construção. A madeira como matéria prima é um dos seus principais destaques. O seu uso é visível em várias etapas durante o processo construtivo, desde os primeiros passos até os acabamentos.

Segundo Deeney *et al* (2018), a madeira está se tornando um material de construção popular devido à sua resistência, leveza e sustentabilidade. Por ser um material com grande abundância, é necessário controlar e fiscalizar o seu uso, pois trata-se de um recurso natural finito e valioso, que deve ser utilizado de forma sustentável para garantir sua disponibilidade no futuro.

De acordo com dados do Abimci (2022), a indústria de madeira tem um papel significativo no desenvolvimento do país. A madeira serrada por exemplo, produziu no ano de 2021, 8,2 milhões de m³ de produto, tendo exportado 3,2 milhões, o equivalente a aproximadamente 39% de sua produção. Já os compensados, o Brasil produziu cerca de 3,4 milhões de m³ para as coníferas e 290 mil m³ para as folhosas, sendo o líder de exportações a nível mundial de compensados produzido com madeira de conífera. No entanto, ao mesmo tempo que essa matéria prima tem a sua importância em um setor com enorme relevância para o desenvolvimento do Brasil, a madeira é um dos recursos naturais cujo a sua exploração é considerado uma das atividades mais prejudiciais ao meio ambiente. A sua exploração ilegal pode levar a degradação ambiental e perda de biodiversidade, podendo assim causar impactos ambientais de âmbito mundial.

De acordo com o Relatório de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (2022), entre 2000 e 2020 houve uma diminuição de

31,9% para 31,2% nas áreas florestais como proporção da área total da terra, equivalendo a uma perda de mais de 100 milhões de hectares de florestas em termos absolutos. Ainda, segundo Dias Leite *et al* (2023), estima-se que, em cerca de 300 anos, mais de 50% de toda área de vegetação natural do planeta já foi dizimada por atividades humanas.

Tendo em vista esse cenário, é necessário medidas legislativas e sustentáveis para que esse recurso natural seja preservado, adotando também medidas que diminuíssem o excesso de extração legal e ilegal, assim, contribuindo para que a escassez não seja um problema futuro.

Segundo Sparovek *et al* (2011), a Constituição reconhece que para que haja uma qualidade de vida, é necessário o equilíbrio ambiental e, a legislação florestal é um instrumento essencial para o interesse da preservação ambiental.

Dentro desse contexto, a busca de meios sustentáveis para atender a alta demanda por recursos naturais vem se destacando no meio científico, onde, estudos buscam alternativas de aumentar o aproveitamento de resíduos (Cazella *et al.*, 2024; De Souza *et al.*, 2023; Rodrigues *et al.*, 2023) com o objetivo de reduzir o seu desperdício, aumentando a sua utilização e melhorando as limitações existentes da própria madeira sólida, como a anisotropia, o diâmetro e comprimento do tronco, defeitos em nós, inclinação de grãos e outros fatores que afetam o uso a qual a madeira é destinada (Paes *et al.*, 2011).

Uma das maneiras de agregar valor ao produto, trazendo uma solução alternativa para a substituição da madeira maciça é a fabricação de derivados de madeira, devido a sua vantagem de possuir maior estabilidade dimensional, menor peso e menor custo, observando-se um menor gasto de energia com menor tempo de produção (Silva, 2016).

Além de agregar valor ao produto, os painéis de madeira, especialmente os agregados, permitem o melhor aproveitamento da matéria-prima lignocelulósica, podendo também contribuir para a redução de novos plantios florestais, evitando também a utilização de madeiras ilegais (Protásio *et al.*, 2015). Ainda, segundo dados do IBÁ (2022), comparando o ano de 2021 com 2020, as vendas de MDF (Medium Density Fiberboard) e MDP (Medium Density Particleboard) totalizaram 4,9 e 3,2 milhões de m³, um aumento de 15,7% e 13,1%, respectivamente, o que mostra como esse setor vem crescendo e exigindo uma alta demanda na sua cadeia de produção.

Durante o processo de fabricação de painéis aglomerados, o gênero *Pinus* desempenha um papel central. Esta espécie é abundante na América do Norte e é extensivamente cultivada nas regiões sul e sudeste do Brasil. Estima-se que a área de plantação de *Pinus* no país abranja cerca de 1,7 milhões de hectares. Essa atividade contribui significativamente para a geração de resíduos lenhosos, variando de 2% a 8% do volume total de madeira colhida (ABIMCI, 2022; Foelkel, 2007; Iwakiri *et al.*, 2010).

Em relação ao adesivo aglomerante para o uso de painéis aglomerados, as resinas à base de formaldeído são as mais comuns, representando aproximadamente 95% da produção de painéis de madeira. Dentre elas a Ureia Formaldeído (UF), Melamina Ureia Formaldeído (MUF) e Fenol Formaldeído (PF) (Dias, 2005; Pędzik *et al.*, 2021). No entanto, essas resinas possuem desvantagens, como perda de resistência à umidade, emissão de formaldeído prejudicial à saúde e ao meio ambiente durante a prensagem, além de serem derivadas do petróleo, o que as torna caras e limita sua utilização na fabricação de painéis aglomerados (Cetin; Ozmen, 2002; Lee *et al.*, 2022; Pizzi; Mittal, 2017; Zau *et al.*, 2014).

No contexto atual, o desafio é reduzir ou eliminar os níveis altos de emissão de formaldeído, substituindo o seu uso por adesivos alternativos a base de combustíveis fósseis sem formaldeído ou pelo uso de aglutinantes à base de materiais renováveis, como o adesivo poliuretano à base do óleo da mamona (Atar *et al.*, 2014; Cazella *et al.*, 2024).

Dentro desse contexto, a busca por um produto com maior valor agregado e que seja menos prejudicial à saúde e ao meio ambiente, como as resinas à base de epóxi, é uma alternativa promissora para substituir as resinas à base de formol. Durante a fabricação de painéis aglomerados, as resinas epóxi não emitem gases nocivos à saúde humana. Além disso, elas podem ser produzidas em larga escala, assim como as resinas à base de petróleo, e aplicadas em diversos campos, como materiais reforçados com fibras, adesivos, revestimentos e materiais de encapsulamento (Jin *et al.*, 2015; Mordor Intelligence, 2024).

Por fim, a realização desse trabalho visa a produção de painéis aglomerados de madeira utilizando partículas de *Pinus* e resina epóxi, à fim de encontrar adesivos substitutos de igual qualidade e desempenho às resinas tradicionais, trazendo novas alternativas para a indústria moveleira bem como reduzir a quantidade de emissão de formaldeído, realizando uma produção mais limpa.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi produzir e avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis de aglomerados homogêneos de partículas de Pinus investigando diferentes teores de resina epóxi (5, 10 e 15%).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Analisar a influência da proporção do adesivo na composição das misturas.
- II. Determinar através dos resultados físicos e mecânicos sua classificação, segundo parâmetros da ABNT NBR 14810-2:2018.
- III. Avaliar os resultados, com o propósito de comparar com pesquisas correlatas as proporções utilizadas de adesivo e seus desempenhos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Esta seção foi organizada em tópicos para esclarecer a revisão literária utilizada na pesquisa sobre a produção de painéis, abordando diversos aspectos, desde a situação atual da indústria florestal brasileira até os métodos de fabricação de painéis industriais e os principais fatores que influenciam suas propriedades finais.

A finalidade dessa seção é proporcionar uma compreensão clara e concisa a respeito dos painéis aglomerados e seus adesivos, abordando além dos materiais os seus respectivos resultados, a fim de compará-los com os da presente pesquisa.

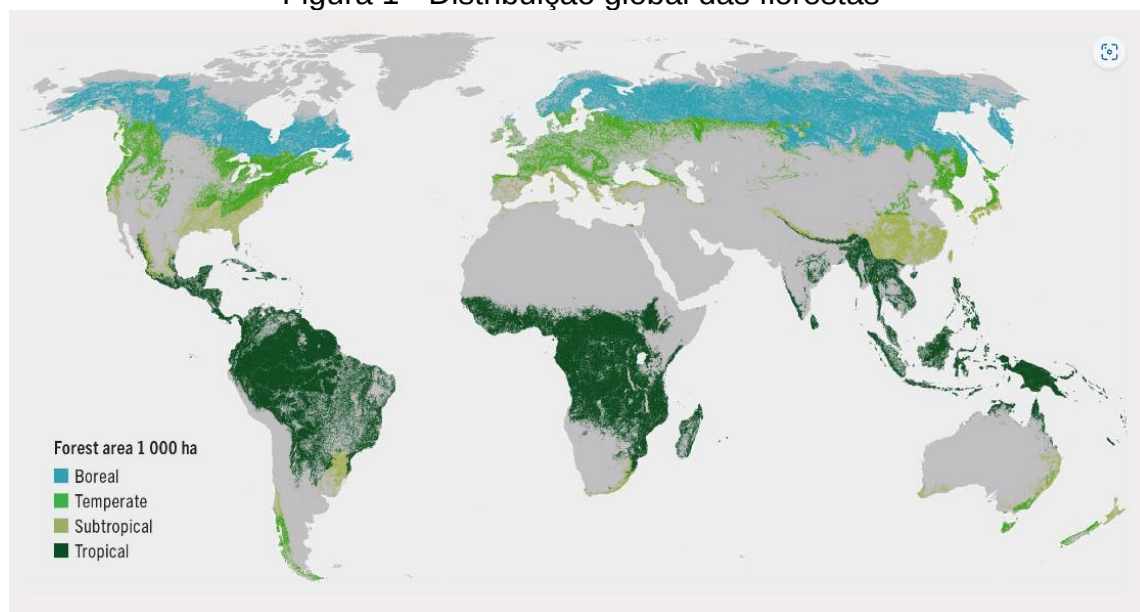
3.1 PANORAMA DO SETOR FLORESTAL

As florestas desempenham um papel indispensável na abordagem de diversas questões envolvendo a sustentabilidade, proteção ao meio ambiente e na mitigação do aquecimento global. Além de reduzir os gases de efeito estufa, elas ajudam a fornecer água e ar limpos, protegem os habitats de animais e plantas (Estoque *et al.*, 2022; Wade *et al.*, 2020).

No mundo, 31% da superfície terrestre é formado por florestas, cobrindo um total de 4,06 bilhões de hectares. Cinco países detêm mais da metade dessa cobertura, o que corresponde a aproximadamente 2,36 bilhões de hectares (54%). Dentre eles, Rússia, Brasil, Canadá, Estados Unidos e China, tendo o Brasil representando a segunda maior área de florestas, com 497 milhões de hectares, atrás apenas da Rússia, com 815 milhões de hectares, conforme ilustrado na Figura 1 (FRA, 2020; FAO, 2022).

A América Latina, que abrange os países da América do Sul, América Central e Caribe, possuem grande responsabilidade envolvendo atividades econômicas que prejudicam o meio ambiente, resultando em altas taxas de desmatamento (Pablo-Romero *et al.*, 2023).

Figura 1 - Distribuição global das florestas



Fonte: FAO (2020)

Em âmbito nacional, o setor florestal tem uma enorme participação no desenvolvimento socioeconômico do país. Por ter um potencial produtivo estimado em 69% da sua cobertura florestal, a sua participação no comércio mundial vem aumentando (SNIF, 2020). Ainda, segundo dados do IBÁ (2022), mesmo com a consequência da chegada da pandemia do Covid-19 no país, o Produto Interno Bruto (PIB), cresceu 4,6% em 2021, e, acima do PIB nacional, houve a participação da cadeia produtiva florestal com crescimento estimado em 7,5%, atingindo recorde na receita bruta de R\$ 244,6 bilhões. As indústrias de base florestal, somaram em exportações cerca de US\$ 11,3 bilhões, o equivalente a 4,3% das exportações brasileiras, gerando em torno de 3,75 milhões de empregos diretos e indiretos (IBÁb, 2022). Estima-se também que entre os anos de 2023 e 2028 será investido R\$ 54,2 bilhões no país, destinados a florestas, P&D, operações, modernização de fábricas e novas unidades (IBÁc, 2022).

No Brasil, a área total de árvores plantadas totalizou 9,93 milhões de hectares em 2021, um crescimento equivalente a 1,9% em relação ao ano anterior, tendo como principais produtores os estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (IBÁ, 2022).

3.2 MADEIRA DE PINUS

Uma das maneiras de competir com o alto volume de uso da madeira nas indústrias, protegendo os recursos naturais da superexploração é o cultivo de espécies de madeira de rápido crescimento. Os pinheiros (*Pinus* spp) por sua vez, são as principais fontes de madeira para construção e indústria moveleira e para a produção de terebintina, breu, celulose e papel (Yang; Li, 2016). Ainda, segundo Iwakiri *et al* (2010), as espécies mais utilizadas na produção de painéis aglomerados e MDF no Brasil, são as do gênero *Pínus* e Eucalipto.

O *Pínus* é uma espécie originária do hemisfério norte e foram introduzidas há mais de cem anos, pelos imigrantes europeus. O gênero *Pinus* possui mais de 100 espécies e somente a partir de 1960 que se deu início ao plantio para escala comercial, nas regiões sul e sudeste do país (EMBRAPA, 2020).

No Brasil, a extração da madeira de *Pinus* acontece a partir sete anos de idade, e é utilizado para produção de madeira para processamento mecânico e extração de resina. A partir dos 10 anos, cada árvore é capaz de produzir de 2,0 a 10,0 kg de resina por ano. As variedades que apresentaram maior adaptação ao solo brasileiro são o *Pinus elliottii* e o *Pinus taeda*, os quais foram introduzidos por meio de sementes importadas de seu habitat natural, os Estados Unidos (EMBRAPA, 2020).

A ABNT NBR 7190 (2022) intitulada: Projetos de Estruturas de Madeira, destaca em seu anexo E as espécies mais frequentes do Brasil, com o objetivo de padronizar as propriedades médias desse gênero, conforme a Tabela 1.

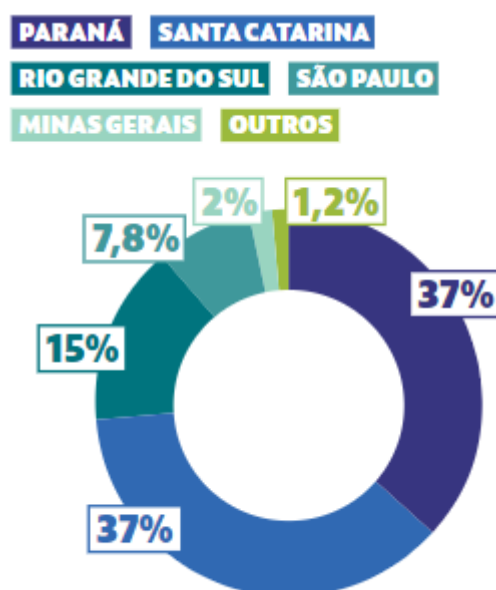
Tabela 1 - Nomenclatura e valores médios de massa específica aparente do gênero Pínus

Nome comum	Nome científico	Massa específica aparente (umidade 12%) (kg/m ³)
<i>Pinus caribea</i>	<i>Pínus caribea</i> var. <i>caribea</i>	579
<i>Pinus bahamensis</i>	<i>Pinus caribea</i> var. <i>bahamensis</i>	537
<i>Pinus hondurensis</i>	<i>Pinus caribea</i> var. <i>bahamensis</i>	535
<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	560
<i>Pinus oocarpa</i>	<i>Pinus oocarpa</i> shiede	538
<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus taeda</i> L.	645

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (2022)

Em 2021, a área total de árvores plantadas no Brasil totalizou 9,93 milhões de hectares, tendo 19,4% dessa área correspondente ao plantio de Pínus, com aproximadamente 1,93 milhão de hectares. Os estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, São Paulo e Minas, são os principais cultivadores do gênero Pínus no país, conforme a Figura 2 (IBÁ, 2022).

Figura 2 - Distribuição dos estados brasileiros de acordo com o plantio de Pínus



Fonte: IBÁ (2022)

A madeira de Pinus tem um grande valor econômico para a indústria madeireira pois possui altas taxas de crescimento rápido e uma boa qualidade de sua madeira, quando comparado a outras coníferas (Nunes *et al.*, 2016).

3.3 PAINÉIS AGLOMERADOS DE MADEIRA

3.3.1 Histórico

Na década de 40 deu-se início na Alemanha a indústria de painéis aglomerados, surgindo com a finalidade de aproveitar os resíduos indústrias e das serrarias, devido à dificuldade de obter matéria prima de boa qualidade para a produção de compensados durante a 2ª Guerra Mundial (Iwakiri, 2005).

Entretanto, logo após a guerra a produção de aglomerados foi paralisada, devido a indisponibilidade de resina, que tinha sua produção baseada no petróleo que foi utilizado para fins militares. Então, no ano de 1946, a produção de painéis foi retomada nos Estados Unidos, com melhorias nos equipamentos e aperfeiçoamento nos processos produtivos (Mendes *et al.*, 2003).

No Brasil, os painéis aglomerados tiveram início na década de 1960, quando o grupo francês Louis Dreiffus construiu a primeira fábrica, chamada de Placas do Paraná, em Curitiba, devido à grande quantidade de resíduos produzidos na região sul, pela indústria moveleira. Já em 1970, surgiu a fábrica da Satipel, em Taquari (RS) e em seguida, foram instaladas fábricas do grupo nacional Peixoto de Castro (Madeplan e Alplan) em conjunto com o grupo alemão Freundenberg, que em 1984 foram comparadas pela Duratex. Foi apenas a partir dos anos 1990 que as fábricas antigas ampliaram e investiram em tecnologia de prensas contínuas, ampliando a sua capacidade e melhorando a sua modernização (Mattos *et al.*, 2008).

A necessidade de produção das chapas de madeira aglomerada no Brasil decorreu da escassez de madeira, bem como da demanda e da ocasião do aproveitamento econômico dos resíduos industriais (Roque; Valença, 1998). As fábricas responsáveis pela produção de painéis aglomerados desempenham um papel importante no setor florestal, pois movimentam diversos tipos de recursos gerando empregos significativos, além da sua importância estratégica para o abastecimento da indústria moveleira (Noce *et al.*, 2008).

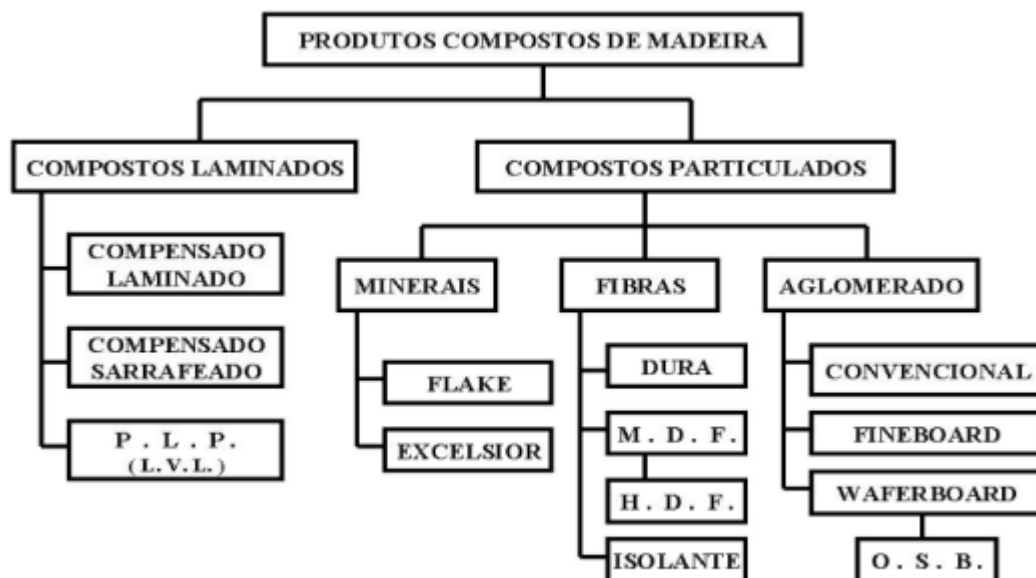
Entre os anos de 1995-2005, o consumo brasileiro de aglomerado/MDP evoluiu de 866 mil m³ para 2.098 mil m³, representando um crescimento médio anual de 9,3% (Mattos *et al.*, 2008).

3.3.2 Aspectos gerais dos painéis aglomerados

Os compostos de madeira vieram com o objetivo de reutilizar os elementos que são processados no setor florestal, a fim de gerar novos produtos de madeira através da sua reconstituição. Desde o início da produção de compensados, que se deu no final do século XIX, os novos compostos de madeira também contribuíram para gerar produtos com um melhor custo-benefício, com cada finalidade específica a que se destinam (Iwakiri, 2005).

De forma geral, os compostos de madeira podem ser classificados conforme a Figura 3.

Figura 3 - Representação dos compostos de madeira



Fonte: Iwakiri (2005)

Os painéis aglomerados são definidos como um produto de madeira fabricado a partir de partículas de madeiras distribuídas aleatoriamente coladas com algum tipo de resina ou outro aglutinante, onde são consolidados através da aplicação de calor e pressão (Iwakiri, 2005; Lee *et al.*, 2022). Ainda, segundo Astari *et al.* (2019), a distribuição das partículas de madeira proporciona melhores propriedades mecânicas em todos os pontos do painel, devido a sua homogeneidade.

A matéria prima utilizada para a produção de painéis aglomerados pode ter origem de diversos setores, como aparas de árvores, fazendo parte do manejo florestal, bem como da indústria de serraria, onde o processamento primário da madeira gera resíduos na forma de partículas, lascas e cavacos (Maraveas, 2020). Além disso, a utilização de madeiras de outras espécies e madeiras menos desejadas podem ser aproveitadas para a fabricação dos painéis, tal como outros materiais lignocelulósicos, como bagaço de cana, casca de arroz e palha de linho (Astari *et al.*, 2019; Iwakiri, 2005). A utilização desses resíduos em conjunto com a mescla de madeiras, agregam valor ao material e otimizam o processo produtivo, além de dar um destino mais nobre e menos poluente para esses materiais (Souza, 2009). Por fim, Gardner (2002) ressalta que os resíduos mais importantes são aqueles provenientes da madeira, onde o correto gerenciamento pode evitar a poluição do solo, rios, além de possibilitar retorno financeiro, na medida em que podem ser reaproveitados.

Outros fatores que influenciam na escolha de matéria prima para o uso na fabricação de aglomerados são as suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, bem como a disponibilidade, possibilidade de armazenamento e volume de fornecimento (Papadopoulou *et al.*, 2015).

Astari *et al* (2019) afirmam também, que os aglomerados vêm ganhando importância no setor moveleiro e de construção, pois podem substituir os componentes sólidos que são utilizados nesses setores.

Conforme afirmado por Iwakiri (2005), os painéis podem ser diferenciados com base na distribuição das partículas na sua composição. Os painéis homogêneos se caracterizam pela presença de partículas distribuídas de forma aleatória por toda a sua extensão, enquanto os painéis de múltiplas camadas, denominados de heterogêneos, apresentam diferenciação entre suas camadas, estabelecida a partir da sua granulometria, de forma que as partículas menores são distribuídas próximas a superfície, enquanto as maiores ficam concentradas no núcleo do painel, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Distribuição das partículas dos painéis aglomerados



Painel Homogêneo



Painel Heterogêneo

Fonte: Adaptado de Cazella (2020)

Ainda, segundo Iwakiri (2005), em relação as demais características, os painéis de madeira aglomerada podem ser classificados da seguinte maneira:

(a) Densidade

- I. Baixa densidade: até $0,59 \text{ g/cm}^3$
- II. Média densidade: de $0,59$ a $0,80 \text{ g/cm}^3$
- III. Alta densidade: acima de $0,80 \text{ g/cm}^3$

(b) Tipos de partículas

- I. Aglomerado “convencional” – partículas tipo “sliver”
- II. Chapas de partículas do tipo “flake – flakeboard”
- III. Chapas de partículas do tipo “wafer – waferboard”
- IV. Chapas de partículas do tipo “strand – strandboard”

(c) Distribuição das partículas na chapa

- I. Chapas homogêneas
- II. Chapas de múltiplas camadas
- III. Chapas de camadas graduadas
- IV. Chapas de partículas orientadas “oriented strand board”

3.3.3 Mercado internacional dos painéis aglomerados

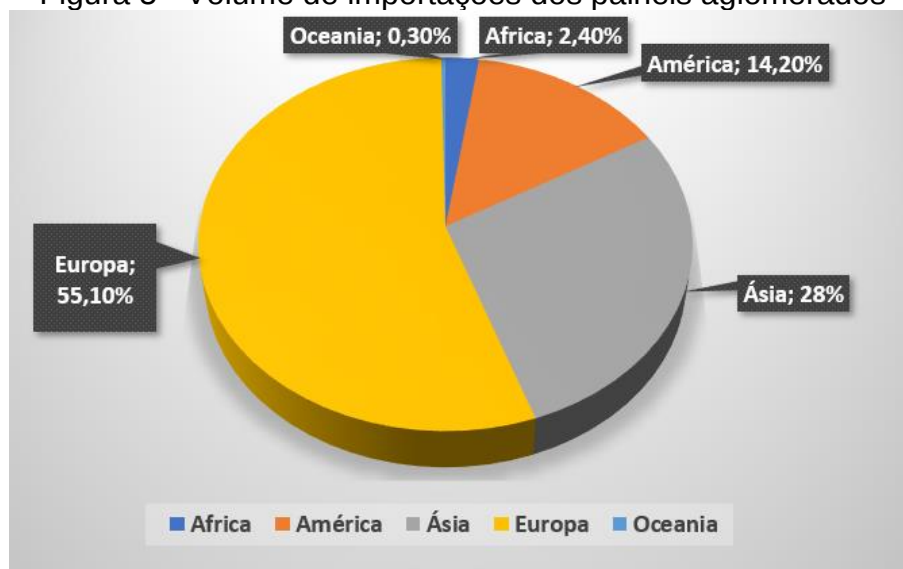
De acordo com Mendes (2010), o mercado mundial de painéis aglomerado vem apresentando um crescimento significativo, impulsionado por diferentes fatores que tem contribuído para o fortalecimento desse setor. Dentre eles, destaca-se a modernização do parque fabril, que tem permitido a adoção de tecnologias mais avançadas e eficientes na produção de painéis. Esse processo de modernização tem resultado no surgimento de novos produtos e ou melhorias nos painéis já existentes, o que tem possibilitado uma maior diversificação e qualidade dos produtos oferecidos.

De acordo com o grupo IMARC (2022), o mercado global de painéis aglomerados atingiu um valor total de 22,2 bilhões de dólares americanos em 2022, com uma expectativa de atingir 27,9 bilhões até 2028. O segmento que tem liderado esse mercado é o residencial, que vem ganhando mais espaço devido à rápida urbanização e ao aumento da população global.

Em 2021, a produção de painéis aglomerados atingiu 103,9 milhões de m³ no mundo todo, o que representa um acréscimo de 7,1% comparado ao ano anterior (97 milhões de m³). A China é o país líder em produção, totalizando 32,9 milhões de m³ em 2021, tendo como proporção 31,6% da produção mundial. Outros países como Rússia, Alemanha, Polônia, Estados Unidos, Turquia e Brasil, estão entre os principais produtores de painel de aglomerado. O Brasil também tem sua participação nessa alta demanda por painéis aglomerados, atingindo a marca de 3,5 milhões de m³ de painéis aglomerados produzidos no ano de 2021 (FAO, 2021).

Neste mesmo ano, os países que mais importaram painéis aglomerados também foram aqueles que mais produziram, tendo como destaque a Alemanha, Polônia, Estados Unidos, China (Lee *et al.*, 2022). O volume de painéis aglomerados importados foi de 24,6 milhões de m³ em 2021 (FAO, 2021). Nesse contexto, podemos observar de acordo com a Figura 5, o continente que mais importou painéis aglomerados foi a Europa, seguido da Ásia e da América.

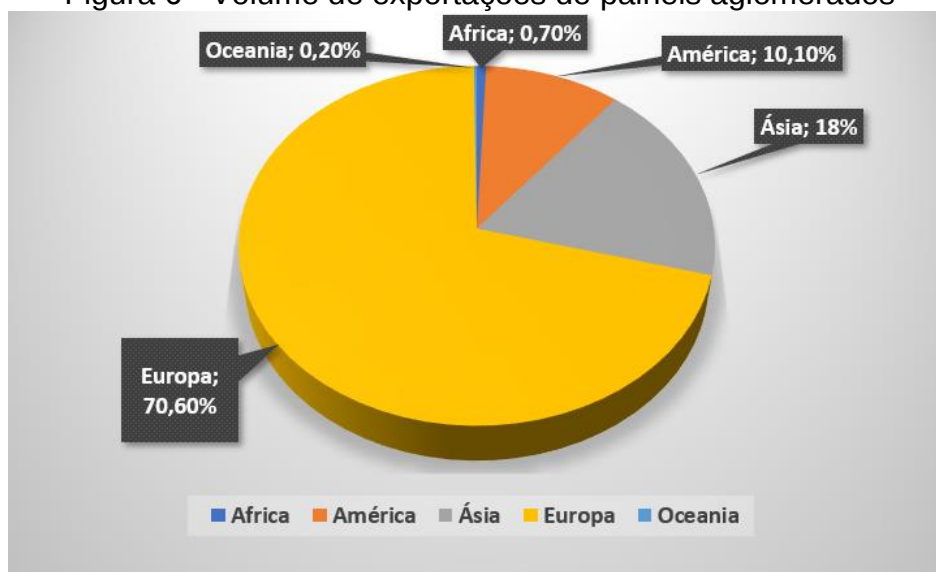
Figura 5 - Volume de importações dos painéis aglomerados



Fonte: Adaptado de FAO (2022)

Já em relação a exportação, os países europeus são os maiores exportadores de painéis aglomerados, tendo a sua parcela no volume total de exportação de 70,6% (Figura 6). A Alemanha por sua vez, demonstra ser um país que além de ter um alto volume de importação, manteve uma taxa alta também para exportações, alcançando um volume de 2,1 milhões de m³, ficando atrás apenas da Tailândia, com 3,03 milhões de m³ (FAO, 2021).

Figura 6 - Volume de exportações de painéis aglomerados



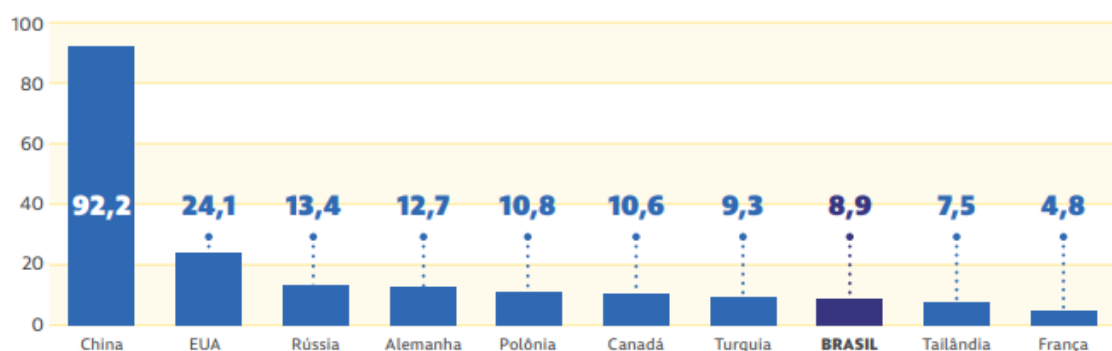
Fonte: Adaptado de FAO (2022)

3.3.4 Setor econômico brasileiro envolvendo a produção de painéis

Gilio (2020) destaca que o Brasil possui um reconhecimento global na produção de painéis aglomerados de madeira provenientes de árvores plantadas, êxito que pode ser atribuído aos contínuos investimentos em tecnologia e automação nas empresas e nos processos produtivos, bem como a implementação de melhores práticas e operações florestais. Esses avanços têm contribuído para aumentar a eficiência e a qualidade dos produtos, tornando então o país uma referência no setor.

Em termos mundiais, o Brasil está posicionado entre os 10 principais produtores de painéis de madeira, como ilustra a Figura 7.

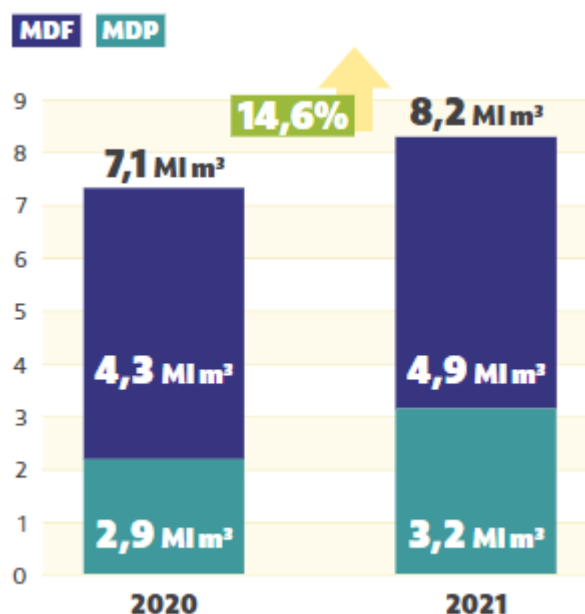
Figura 7 - Principais produções mundiais de painéis de madeira (milhões de m³)



Fonte: Relatório Anual IBÁ (2021)

Devido ao início da pandemia e um novo formato de trabalho, o setor de painéis de madeira apresentou em 2021 um crescimento de 14,6% em comparação com o ano anterior. A Figura 8, ilustra também o aumento nas vendas de MDF e MDP de 15,7% e 13,1% respectivamente, um volume total de aproximadamente 8,2 milhões de metros cúbicos (IBÁ, 2022).

Figura 8 - Vendas domésticas de painéis de madeira (milhões de m³)



Fonte: Relatório Anual IBÁ (2021)

Em relação a exportações, painéis e pisos laminados tiveram participação de US\$ 0,4 bilhões na balança comercial por produto (IBÁ, 2022), um aumento de 33,3% em relação ao ano anterior de US\$ 0,3 bilhões (IBÁ, 2021).

Os compensados de pinus tiveram uma alta no mercado, seu volume de exportação em 2021 alcançou 2,6 milhões de m³, uma alta de 4% em relação ao ano anterior (IBÁ, 2022).

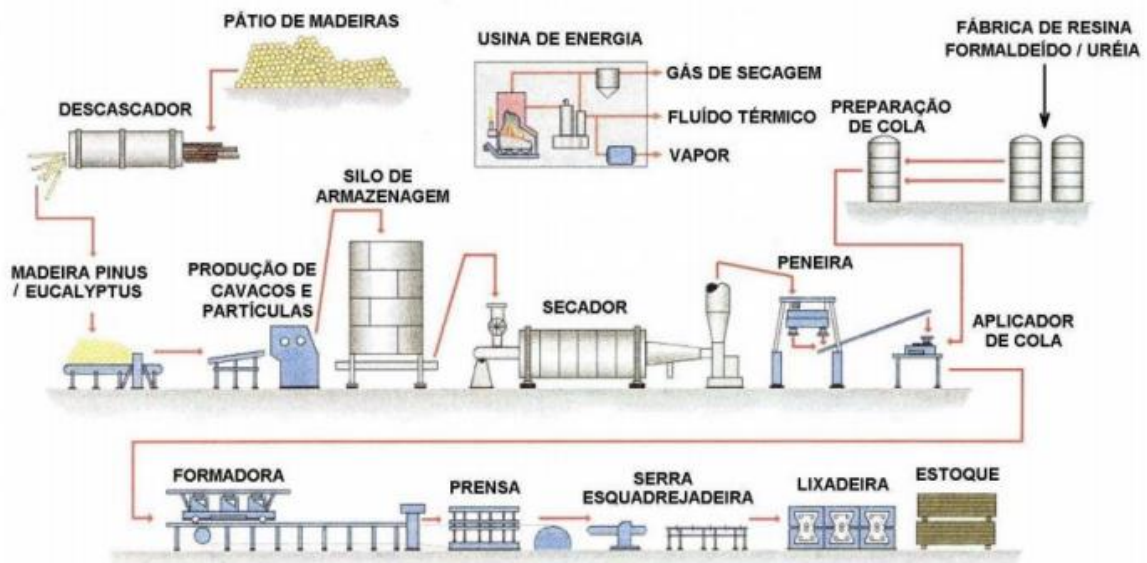
3.3.5 Fabricação industrial e produção de painéis aglomerados

Iwakiri (2005), em seus estudos, estabelece que o processo de fabricação dos painéis de madeira aglomerada segue um fluxo, conforme a Figura 9, envolvendo algumas etapas que podem ser descritas da seguinte maneira:

- Geração de partículas - nessa etapa são definidos quais os elementos serão utilizados no painel, tal como as suas dimensões;
- Secagem – as partículas devem passar por procedimentos para a estabilização de sua umidade, assim evitando complicações com a cura da resina, tal como a qualidade final dos painéis;

- Classificação - as maiores partículas são alocadas na camada interna, enquanto as menores são direcionadas para a camada externa, quando há a produção de painéis multicamadas;
- Aplicação do adesivo – nessa etapa são aplicados adesivos de acordo com a sua finalidade, onde, normalmente é utilizado de 6 a 12% em relação ao peso seco das partículas;
- Formação do colchão;
- Pré-prensagem - etapa para estabilização e ajuste da altura desejada, além de aprimorar a consistência do painel;
- Prensagem a quente - a pressão, temperatura e tempo de fechamento da prensa são fatores cruciais nessa fase;
- Resfriamento;
- Acondicionamento - o painel deve ser mantido em condições adequadas de acondicionamento por pelo menos 48 horas;
- Acabamento - fase em que o produto ganha valor agregado;
- Classificação - de acordo com os padrões de qualidade pré-estabelecidos;
- Embalagem;
- Armazenamento.

Figura 9 - Fluxograma da fabricação dos painéis aglomerados



Fonte: Adaptado de Iwakiri (2005)

Ainda, em relação a fabricação dos painéis, Solt *et al* (2019) estipula que para a fabricação de painéis, cada etapa demanda de um custo, dentre eles o de matéria-prima está classificado como maior custo, 30 a 40%, seguido do custo de adesivo/resina, 15 a 30%. Segundo Atar (2014) a Ureia-formaldeído (UF) é o principal aglutinante utilizado para a fabricação de painéis de madeira, devido ao seu curto tempo de prensagem, baixo custo e excelente adesão, o que torna o adesivo como mais comumente utilizado nas fábricas. Outros componentes do custo primário, como energia, mão de obra e custo de processamento do painel, representam cerca de 15 a 20%, 5 a 20% e 25 a 30%, respectivamente.

3.3.6 Fatores que influenciam nas propriedades dos painéis aglomerados

No processo produtivo dos painéis de madeira, algumas variáveis interagem e exercem influência sobre as propriedades do produto final. Segundo Moslemi (1974), Kelly (1977) e Maloney (1993), dentre as principais variáveis destacam-se a massa específica da madeira, densidade do painel, geometria das partículas, teor de umidade, tipo e teor do adesivo, método de formação do colchão e os parâmetros de prensagem. Esses fatores são determinantes para a qualidade do painel, pois influenciam diretamente nas propriedades físicas e mecânicas e devem ser monitorados e controlados de forma adequada a fim de garantir o desempenho e a durabilidade do produto final.

Dentre os fatores que determinam as propriedades físicas do painel, a densidade é uma das características que possui maior influência.

A densidade está relacionada a quantidade de partículas para uma determinada dimensão do painel. Em outras palavras, quanto maior for a quantidade de partículas com mesma densidade empregadas para uma dada dimensão, maior será a densidade do painel resultante (Maloney, 1993). Painéis produzidos com espécies de baixa densidade, apresentam maior resistência a flexão estática e ligação interna, no entanto, absorção de água, inchamento em espessura e arrancamento de parafuso são pouco afetadas (Moslemi, 1974).

No processo produtivo, quando se é utilizado partículas de madeira de baixa densidade, durante a prensagem, ocorre um contato relativamente maior entre as partículas, devido ao seu maior volume e uma maior razão de compactação (Moslemi, 1974), onde a razão de compactação é a relação entre a massa específica da madeira e a massa específica do painel, sendo a faixa ideal considerada entre 1,3 e 1,6 para que ocorra um contato adequado entre as partículas e a ligação do adesivo entre elas (Maloney, 1993; Moslemi, 1974). De acordo com Kelly (1977), em painéis com maior razão de compactação, há uma maior quantidade de partículas de madeira, resultando numa maior densificação do painel. Entretanto, tal densificação pode gerar tensões de compressão que são liberadas durante o processo de prensagem, ocasionando um maior inchamento em espessura. Em um estudo realizado por Iwakiri *et al* (1996), observou-se que aumentando a razão de compactação, ocorreu um aumento nos valores médios de absorção de água e de inchamento em espessura.

A geometria das partículas é outro fator que possui influência na qualidade final do produto. A resistência mecânica, flexão estática, tração perpendicular a superfície da chapa são fatores dependentes diretos da geometria. Para Kelly (1977) e Araujo *et al* (2019), as dimensões devem ser controladas para se obter maior homogeneidade, pois partículas grandes podem gerar problemas na secagem, aplicação de adesivo, formação do colchão, devido ao fato de se tornarem volumosas.

De acordo com Gonçalves *et al* (2000), as partículas podem ser classificadas quanto a sua geometria como:

- a. Cavacos: são partículas longas e espessas, seus tamanhos variam de 5 a 50 mm, podendo ser com ou sem casca, obtidas por picadores no corte de madeiras descartadas.
- b. Serragem: são partículas curtas e finas, obtidas pelo corte de toras e retirada de costaneiras com dimensões entre 0,5 e 2,5 mm.
- c. Maravalha: são denominadas como partículas longas e finas, variando a largura, obtidas pelo fresamento de peças de madeira e que apresentam dimensões maiores que 2,5 mm.

Segundo Thoemen *et al* (2010), em relação as propriedades no geral, partículas longas e finas apresentam um melhor desempenho, no entanto, as partículas pequenas possuem mais desempenho quando se trata da superfície do painel. Devido a

esse motivo, os fabricantes optam por utilizar as partículas finas nas camadas superficiais e as maiores para o núcleo do painel. Iwakiri (2005) completou também, que o índice de esbeltez (divisão do comprimento da partícula pela sua espessura), são responsáveis por algumas características dos painéis, tal como propriedades mecânicas e dimensionais, características de superfície e usinabilidade.

Os pesquisadores Maloney (1993), Mosleni (1974), Iwakiri (2005), Kelly (1977), ressaltam que partículas menores requerem maior quantidade de adesivo para uma adesão completa, uma vez que essas partículas apresentam maior área específica exposta.

Outro fator que influencia nas propriedades finais do painel é o teor de umidade das partículas. Teores altos e baixos tem efeito significativo no processo de produção dos painéis, como a cura da resina, tempo de prensagem e pressão necessária para a consolidação do painel e devido a isso devem ser controlados. (Iwakiri, 2005). Partículas com um baixo teor de umidade aumenta o risco de incêndio durante a prensagem dos painéis, geram maior quantidade de pó, transferem pouco calor da superfície até o núcleo, diminuem o fluxo da transferência da resina, pois gera uma alta absorção da resina, interferindo na sua distribuição ao longo do painel (Iwakiri, 2005; Maciel, 2001; Moslemi, 1974). Por outro lado, partículas com alto teor de umidade podem provocar bolhas no interior do painel, exigem maior tempo de prensagem e interferem na qualidade da adesão das partículas com a resina (Iwakiri, 2005; Kelly, 1977; Maciel, 2001).

Portanto, para evitar tais problemas durante o processo de produção dos painéis, Iwakiri (2005) ressalta que o teor de umidade médio ideal é de 3% a 6%, dependendo do tipo de resina a ser aplicado. Com essas definições estabelecidas, o processo pode trazer certas vantagens, tais como rápidas consolidações das camadas superficiais, menor ciclo de prensagem, rápida transferência de calor entre as camadas do painel e previne a pré-cura do adesivo na superfície das partículas (Maciel, 2001).

O tempo de prensagem consiste no intervalo de tempo transcorrido desde o momento em que o colchão é comprimido até o momento em que os pratos da prensa são abertos. O tempo deve ser o suficiente para possibilitar que o excesso de água migre para fora do painel através das bordas laterais, permitindo a cura da resina (Kelly, 1977; Maciel, 2001).

Já a temperatura de prensagem tem a função de propiciar a polimerização e a cura do adesivo, tal como a plasticização da madeira e, reduzir a resistência da madeira a compressão, facilitando a consolidação do colchão e o painel chegar a uma espessura final (Iwakiri, 2005).

3.3.7 Requisitos normativos de painéis aglomerados

No Brasil, a avaliação das condições de aplicação e qualidade dos painéis produzidos são realizadas com base em ensaios que determinam suas propriedades físicas e mecânicas, conforme estabelecido pelas normas ABNT NBR 14810-1 (2013) e ABNT NBR 14810-2 (2018).

Ainda, de acordo com a NBR 14810-2 (2018), os painéis de partículas de média densidade são classificados em seis tipos, conforme os valores informam Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 - Valores mínimos das propriedades físicas e mecânicas informados

Classificação	I24h (%)	T.U. (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P. (MPa)
P2	22	5-13%	11	1800	0,4
P3	17	5-13%	15	2050	0,45
P4	16	5-13%	16	2300	0,4
P5	11	5-13%	18	2550	0,45
P6	16	5-13%	20	3150	0,6
P7	10	5-13%	22	3350	0,75

Fonte: Adaptado da NBR 14810-2 (2018)

3.4 ADESIVO

O adesivo em conjunto com as partículas/lascas de madeiras são os principais componentes de um painel aglomerado. A utilização de adesivos é uma prática antiga da humanidade, tendo registros datados de 3000 a.C. quando os egípcios já usavam uma goma arábica extraída de essências florestais, bem como uma cola produzida a

partir de pasta de farinha, para a fabricação dos primeiros papiros de lâminas finas, justapostas e coladas (Azevedo, 2009).

Classifica-se como adesivo todo material que possui propriedades aderentes, ou seja, é uma substância com capacidade de unir outros materiais em sua superfície (Iwakiri, 2005). Ainda, segundo a ABNT NBR 14810-1 (2013), o adesivo pode ser também definido como uma substância, tanto orgânica quanto inorgânica utilizada como propósito de aglutinar partículas de madeira para a formação de um painel.

Os adesivos podem se classificar em dois grupos: os de origem natural que podem ser obtidos a partir de proteínas animais, vegetais, celulose, entre outros, e os de origem sintética, onde a sua fabricação é objetivada para serem semelhantes aos naturais, tal como ureia, resorcinol, fenol, melanina, entre outros, podendo também serem separados em termofixos e termoplásticos (Carneiro, 2010; Nascimento *et al.*, 2015).

Almeida *et al* (2010), destaca que algumas propriedades dos adesivos podem influenciar na qualidade da colagem da madeira, assim influenciando diretamente nas propriedades do painel. Dentre essas propriedades, pode-se destacar: viscosidade, tempo de trabalho, teor de substâncias sólidas e pH. Essas propriedades físico-químicas devem ser estudadas para que se possa verificar se o processo de aglutinação das partículas se deu conforme planejado, assim, evitando problemas futuros com o produto final (Iwakiri, 2005).

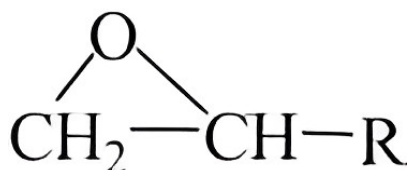
Por fim, Razera (2006) descreve que o processo de adesão só é finalizado quando o adesivo passa do estado líquido para o sólido, levando ainda em consideração que o tempo em que essa transformação ocorre é crucial para a ligação dos materiais.

3.4.1 Epóxi

A descoberta da Resina Epóxi aconteceu no ano de 1909, por um russo químico chamado Prileschajew, porém, apenas em 1947 obteve uma estreia comercial significativa, nos Estados Unidos, quando a empresa Devoe-Raynolds Company produziu um polioli para a preparação de óleos secativos e sintéticos (May, 2018).

As Resinas Epóxi são definidas como pré-polímeros de baixo peso molecular contendo mais de um grupo epóxido, conforme ilustrado na Figura 10. O pré-polímero Epóxi mais comumente usado é o éter diglicidílico do bisfenol A (DGEBA), que é produzido a partir do bisfenol A derivado de fósseis (BPA). Elas são consideradas resinas termofixas, que necessitam de agentes de cura e sistemas de cura. Os agentes de cura são capazes de promover ou controlar a reação de cura da resina e podem ser divididos em agentes de cura do tipo amina, de cura alcalinos, anidridos e agentes de cura catalíticos de acordo com suas composições químicas. Um dos sistemas de cura mais utilizado é o calor. Resinas Epóxi curadas em temperaturas mais altas tem maior resistência à tração, ao calor e maior resistência química (Auvergne *et al.*, 2014; Jin *et al.*, 2015; Jin; Park, 2012). Na ausência de agentes de cura, o epóxi pode ser utilizado como plastificante e estabilizadores para resinas vinílicas (May, 2018).

Figura 10 - Forma molecular da resina epóxi



Fonte: Journal of Industrial and Engineering Chemistry (2015)

O interesse por resinas epóxi se origina pela ampla variedade de reações químicas e materiais que podem ser utilizados para cura tal como as diferentes propriedades resultantes. Ao contrário de resinas de formaldeído, a emissão de gases não é liberada durante o seu processo de cura, o que o torna uma solução mais viável e sustentável (May, 2018).

As resinas epóxi são amplamente empregadas em diversos campos devido às suas excelentes propriedades mecânicas, alta adesividade a muitos substratos e boas resistências químicas e térmicas. Atualmente são utilizadas como adesivos de uso geral, atuam como materiais reforçados com fibras, revestimentos de alto desempenho, materiais eletrônicos e de encapsulamento e em implantes dentários (Jin *et al.*, 2015; Tabuse *et al.*, 2014).

Devido a sua grande gama de aplicações, o a produção de resina epóxi no ano de 2024 está estimado em 3,55 milhões de toneladas, com um potencial de alcançar

a marca dos 4,20 milhões de toneladas em 2029, segundo dados do Mercado de Resinas Epóxi (2024).

3.5 PAINÉIS AGLOMERADOS E ADESIVOS

Diversas pesquisas foram realizadas para a produção de painéis aglomerados, visando estudar a substituição da Ureia Formaldeído (UF), que é o principal aglutinante utilizado nas indústrias, concentrando a busca pela redução das emissões ou da exposição ao formaldeído, tal como adesivos à base de combustíveis fósseis sem formaldeído ou pelo uso de adesivos à base de materiais renováveis, como aqueles a base de farinha de soja (Yin *et al.*, 2021) bio-adesivos a base de lignina e tanino (Ang *et al.*, 2019; Mansouri *et al.*, 2011) e adesivos a base de óleos vegetais (Baharuddin *et al.*, 2023; Cazella *et al.*, 2024).

3.5.1 Painéis aglomerados de pinus e adesivo convencional a base de ureia formaldeído

O gênero *Pinus* é um dos principais utilizados na produção de painéis aglomerados, principalmente devido ao seu rápido crescimento, que contribui para atender a alta demanda das indústrias moveleiras (IBÁ, 2022). Nesse contexto, algumas pesquisas foram desenvolvidas para estudar um pouco mais a fundo do comportamento dos painéis aglomerados produzidos a partir desse gênero com o adesivo mais comum utilizado nas fábricas, o UF.

Sozim *et al* (2019) produziram e avaliaram as propriedades física e mecânicas de painéis aglomerados produzidos a partir de *Ligustrum lucidum* W.T. Aiton, tanto em sua forma pura quanto combinada com *Pinus taeda*. O objetivo foi comparar essas propriedades com os padrões regulatórios e com os painéis feitos exclusivamente com *Pinus taeda*. Os painéis foram fabricados utilizando adesivos à base de ureia-formaldeído e tanino-formaldeído, em uma proporção de 10% de massa sólida em relação

à massa seca das partículas. Para a produção dos painéis, foram definidas uma densidade nominal de 0,75 g/cm³, pressão de 3,92 MPa, temperatura de 160°C e tempos de prensagem de 8 minutos para o adesivo à base de ureia-formaldeído e 10 minutos para o adesivo à base de tanino-formaldeído.

Nos painéis que tinham apenas na sua composição Pinus e UF (10%), os autores obtiveram painéis com densidade de aproximadamente 0,7 g/cm³ com resultados físicos de Absorção e Inchamento em 24h de 90,02 e 31,47 %, respectivamente, quanto para os resultados mecânicos de MOE, MOR e TP de 7,58, 870 e 0,65 MPa, respectivamente.

Os autores concluíram que a utilização da espécie de Pinus combinada com a de *Ligustrum lucidum* são promissores para a fabricação de painéis aglomerados, tendo a combinação das duas espécies com 10% de UF a que trouxe os melhores resultados.

Iwakiri *et al* (2014) produziram painéis aglomerados de *Pinus Taeda* com substituições parciais da espécie *Sequoia sempervirens*, nas proporções de 100%, 0%, 75%, 50% e 25%, utilizando como aglutinante a ureia-formaldeído na proporção de 10% com base no peso seco das partículas. Os parâmetros de prensagem utilizados foram de 4 MPa de pressão de prensagem, 160°C de temperatura e 8 minutos.

Os resultados encontrados a partir da mistura de 100% de Pinus com 10% de adesivo UF em relação aos ensaios físicos foram de, 52% para Absorção 24h e de 22% de Inchamento após 24h. Já para os ensaios mecânicos, a mistura obteve resultados de 12,78 MPa para o ensaio de MOR, 1847 MPa para o ensaio de MOE e de 0,58 MPa para o ensaio de TP.

De acordo com os resultados obtidos, os autores concluíram que os painéis produzidos a partir da *Sequoia* tiveram resultados superiores aos produzidos com o Pinus, sendo a mistura com 50% de cada espécie o com melhor desempenho.

Em estudos feitos por Carvalho *et al* (2014), com objetivo de avaliar painéis aglomerados de *Pinus caribaea* substituindo parcialmente a UF (10% da massa seca das partículas) com proporções de Tanino de *Pinus caribaea* e Tanino de *Acacia mearnsii*. Os parâmetros de prensagem utilizados pelos autores foram de 3 MPa, 180°C e 9 minutos.

Os resultados obtidos a partir da mistura com 10% de UF, sem nenhuma substituição com as partículas de Pinus, foram de 34,8 % para o Inchamento após 24h e

93,7% para Absorção 24h, enquanto os resultados de MOR, MOE e TP foram de 9,18; 1165,52 e 1,05 MPa respectivamente.

Os autores concluíram que o Tanino de pinus apresenta potencial para ser utilizada como fonte de tanino, principalmente se for utilizada a parafina.

Sanches *et al* (2016) produziram painéis aglomerados a fim de avaliar a resistência na produção dos painéis com partículas de madeira de *Pinus taeda*, *Eucalyptus saligna*, *Mimosa scabrella* e *Hovenia dulcis*, em várias proporções de mistura e duas composições de camadas. Os painéis foram produzidos em combinações de duas, três e quatro espécies para painéis monocamada, e combinações de duas espécies para painéis multicamadas, além de painéis feitos exclusivamente com *Pinus taeda*. O adesivo utilizado foi à base de ureia-formaldeído na proporção de 10% do peso seco das partículas. Já os parâmetros durante a prensagem foram de 160°C, 4 MPa e 8 minutos.

Para os resultados obtidos a partir dos painéis de *Pinus* com 10% de UF, os autores encontraram nos ensaios mecânicos os valores de 9,46 MPa para MOR, 1039, 06 MPa para MOE e 1,24 MPa para TP.

Por fim, os autores concluíram que os painéis com multicamadas obtiveram os melhores resultados e que as madeiras das espécies bracatinga e uva-do-japão, que ainda não são utilizadas em escala industrial, mostraram-se adequadas para a fabricação de painéis aglomerados quando misturadas com espécies de menor massa específica.

Cassia *et al* (2009) estudaram o comportamento de painéis aglomerados de *Pinus Elliottii* substituindo parcial ou integralmente os adesivos à base de ureia-formaldeído por adesivos de taninos extraídos da casca de angico-vermelho (*Anadenanthera peregrina*) e hidrolisados, na proporção de 8% da massa seca das partículas. Os painéis foram prensados a 3,2 MPa, durante 8 minutos a 170°C.

A mistura utilizando a UF sem nenhuma substituição obteve valores de ensaios físicos de 88,9% de Absorção 24h e 24,07 de Inchamento após 24h. Para os ensaios mecânicos, os valores obtidos foram de 19,96 MPa para MOR, 2329 MPa para MOE e de 0,78 MPa para TP.

Os autores a partir dos resultados, puderam concluir que incorporar até 25% de taninos ao adesivo ureia-formaldeído resulta em diminuição do módulo de elasticidade. A utilização conjunta de adesivos tânicos com os adesivos à base de ureia-formaldeído resultou em aumento em certas propriedades mecânicas.

A Tabela 3 demonstra o quantitativo encontrado pelos autores relatados na literatura de forma resumida.

Tabela 3 - Resultados obtidos da literatura para painéis de Pinus e UF

Autor (es)	Teor de adesivo UF (%)	Condições de prensa-gem			Resultados físicos		Resultados mecânicos		
		Pressão (MPa)	Temp. (°C)	Tempo (min)	I24h (%)	A24h (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P. (MPa)
Sozim <i>et al</i> (2019)	10	3,92	160	8	31,47	90,02	7,58	870	0,65
Iwakiri <i>et al</i> (2014)	10	4,00	160	8	22,00	52,00	12,78	1847	0,58
Carvalho <i>et al</i> (2014)	10	3,00	180	9	34,80	93,70	9,18	1165,5	1,05
Sanches <i>et al</i> (2016)	10	4,00	160	8	-	-	9,46	1039,1	1,24
Cassia <i>et al</i> (2009)	8	3,20	170	8	24,07	88,90	19,96	2329	0,78

Fonte: Elaborado pelo autor

3.5.2 Painéis aglomerados de pinus e adesivo epóxi

Para o presente tópico, foi adotado uma breve revisão bibliográfica a fim de analisar a tendência da utilização de resina epóxi na fabricação de painéis aglomerados. As plataformas utilizadas foram a ScienceDirect, Scopus e Periódicos CAPES, em conjunto com a string ("particleboard" OR "particle board") AND ("epoxy" OR "epoxy AND resin"). A partir da revisão, constatou que apenas um artigo buscou avaliar a utilização da resina epóxi em conjunto com partículas de madeira para a produção de painel aglomerado, onde, o presente autor dessa pesquisa também foi um dos autores desse artigo, o que acabou utilizando os resultados obtidos como uma forma de estudo exploratório para a presente pesquisa.

Herradon *et al* (2023) produziu e avaliou painéis aglomerados feitos a partir de resíduos de Pinus da movelaria, a partir da utilização de 2 adesivos, dentre eles o adesivo epóxi nas proporções de 10 e 15 %, e o adesivo poliuretano a base do óleo

da mamona (PUR) na proporção de 10%. Os parâmetros utilizados foram de 4 MPa, 10 minutos e 110°C.

Os autores obtiveram os resultados quando trabalharam com 10% de adesivo de 48,03 e 99,08 % de Absorção e Inchamento após 24h, respectivamente, enquanto para os resultados mecânicos foram de 5,37; 614 e 0,64 MPa para os resultados de MOR, MOE e TP, respectivamente.

Quando trabalhado com 15% de adesivo epóxi, obtiveram os valores de Absorção e Inchamento após 24h de 25,55 e 55,64 %, respectivamente, obtendo valores de MOR, MOE e TP de 9,80; 1243 e 1,31 MPa, respectivamente.

Os autores concluíram que o adesivo epóxi pode ser uma substituição de desempenho equivalente quando comparado com os painéis produzidos a partir da mesma porcentagem (10%) de adesivo PUR, apresentando então um potencial como adesivo emergente no mercado.

3.6 CONCLUSÕES DA REVISÃO

Conforme observado na literatura citada acima, o adesivo é um componente essencial na fabricação dos painéis aglomerados, influenciando significativamente suas propriedades físicas e mecânicas. Atualmente, existe um mercado consolidado para painéis aglomerados fabricados com adesivos à base de formol. No entanto, diversas pesquisas estão sendo realizadas para substituir, mesmo que parcialmente, esses adesivos por alternativas mais limpas e sustentáveis, visando beneficiar tanto o ser humano quanto o meio ambiente

Nesse contexto, a utilização do adesivo epóxi é pouco explorada, indicando ser um adesivo promissor para uma possível substituição da ureia-formaldeído nas indústrias de painéis aglomerados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS PARA PRODUÇÃO DOS PAINÉIS

4.1.1 Pinus

O *Pinus ssp* utilizado nos estudos foi obtido através do processamento de tábuas, adquiridas no comércio local de Ilha Solteira, São Paulo, com auxílio da plaina desgrossadeira. Esse procedimento gera as maravalhas que futuramente foram transformadas em partículas pelo moinho de facas, para que possa se adequar as dimensões propostas no trabalho.

4.1.2 Adesivo Epóxi

O adesivo Epóxi, com o nome comercial de Resina Epóxi 2004, foi adquirido através de compra pela empresa Redelease – Redecenter, localizada na cidade de São Paulo – SP.

O Epóxi é um adesivo bicomponente, conforme Figura 11, tendo na sua composição a Resina 2004 e o Endurecedor 3154. A proporção indicada pelo fabricante é de 2:1, sendo 50g do endurecedor a cada 100g de Epóxi.

Figura 11 - Adesivo Epóxi



Fonte: Do autor

Ainda de acordo com o fabricante, o Epóxi é um produto líquido, viscoso, resultante da reação de Epicloridina com Bisfenol-A. Já o endurecedor é a base de poliamina modificada. A mistura possui um tempo de endurecimento de 4-6 horas depois de homogeneizada, com um tempo de cura total de 7 dias.

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Estudo exploratório

Um estudo preliminar foi realizado a fim de avaliar as possíveis propriedades dos painéis produzidos com as porcentagens de 10 e 15 % de epóxi, bem como comparar a utilização com o adesivo Poliuretano a base do óleo da mamona (PUR), onde foi utilizado a proporção de 10%. Todos os painéis foram prensados a 4 MPa, a 110°C durante 10 minutos, onde constatou valores promissores para os painéis produzidos com adesivo epóxi (Herradon *et al.*, 2023). A Figura 12 ilustra os aspectos dos painéis que foram produzidos.

Figura 12 - Painel aglomerado (a) 10% de PUR (b) 10% de Epóxi



Fonte: Herradon et al (2023)

A partir do estudo exploratório, foram estabelecidas as seguintes definições para os tratamentos da atual pesquisa no subitem abaixo.

4.2.2 Definição dos tratamentos

A partir dos resultados obtidos do estudo exploratório, foram definidas 3 misturas, constituídas de 100% de madeira Pinus com variações de 5, 10 e 15% de adesivo epóxi em relação a massa seca das partículas, conforme apresentado na Tabela 4, a fim de avaliar a eficiência do adesivo de acordo com a diminuição de sua proporção, com finalidade também de comprar os resultados com literaturas correlatas que utilizaram a mesma porcentagem de adesivo.

Tabela 4 - Misturas propostas para confecção dos painéis

Mistura	Pinus (%)	Epóxi (%)
5EP	100	5
10EP	100	10
15EP	100	15

Fonte: Elaborado pelo autor

Considerou-se também uma densidade nominal de 0,5 g/cm³, valor aproximado ao utilizado em estudos correlatos por Cazella (2022) e Gilio (2020). Embora esse valor possa ser considerado baixo para a densidade alvo, a escolha se justifica pela necessidade de ajustar a densidade final devido à alta densidade do adesivo epóxi

No que se refere ao procedimento metodológico, o adesivo epóxi foi utilizado na proporção de 2 partes de Resina para 1 parte de Endurecedor, conforme instruções do fabricante.

Em relação aos parâmetros de prensagem, todos os painéis foram prensados com temperatura de 110°C, 5 MPa e 10 min, baseados nos parâmetros de Cazella (2022) e Gilio (2022), buscando também aumentar a pressão de prensagem quando comparado com o estudo exploratório, a fim de melhorar as propriedades dos painéis.

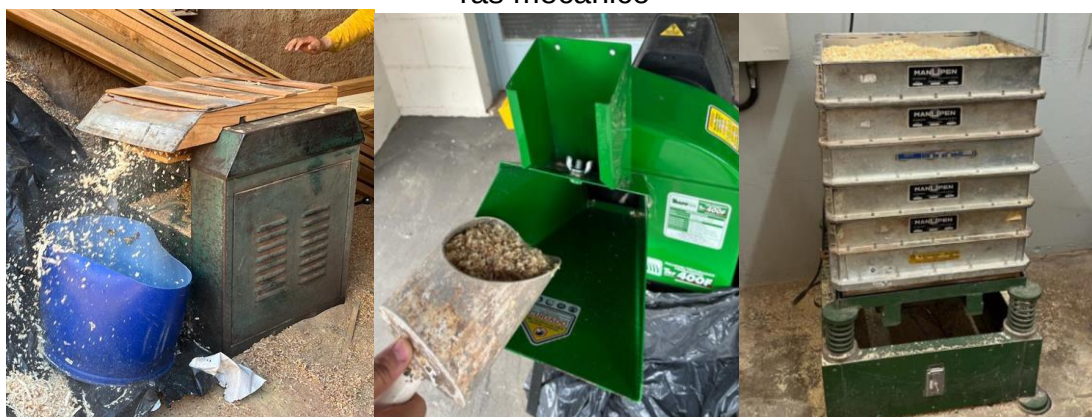
Portanto, para cada uma das três proporções de misturas propostas, foram produzidos três painéis, totalizando nove painéis.

4.2.3 Produção das partículas

Para a produção das partículas de Pinus, foi inicialmente utilizado uma plaina desengrossadeira para obtenção das maravalhas e em seguida foi necessário processá-las em um moinho de facas, com peneira de abertura de 12mm para a produção das partículas.

Por fim, foi utilizado um agitador de peneiras mecânico para selecionar as partículas retidas nas peneiras $\frac{1}{4}$, 4 e 8, com malhas de 6,3; 4,76 e 2,38 (mm) respectivamente. As partículas foram depositadas no agitador e foram peneiradas num período de 7 minutos. A Figura 13 ilustra os processos citados anteriormente.

Figura 13 - (a) plaina desengrossadeira, (b) moinho de facas, (c) agitador de peneiras mecânico



(a)

(b)

(c)

Fonte: Do autor

4.2.4 Composição granulométrica

Após a separação das partículas, foi realizado o ensaio de determinação da composição granulométrica, adequando da norma ABNT NBR NM 248 (2003), onde a massa da amostra deve ser no mínimo de 300g, porém, quando se trata de madeira, que possui uma massa específica mais leve em comparação a areia ou brita, foi adotado uma massa de 35g com um tempo de agitação de 15 minutos no nível 4 de vibração, seguindo o mesmo conforme (Bispo, 2020; Souza, 2022).

A geometria das partículas tem grande importância para as propriedades finais dos painéis. A partir dela, é possível ajustar os comprimentos e as quantidades das partículas, bem como o módulo de finura das misturas, proporcionando uma maior uniformidade do tamanho das partículas, permitindo uma distribuição mais homogênea do adesivo utilizado, otimizando o processo de fabricação e melhorando a eficiência do material.

As peneiras utilizadas nesse ensaio, ilustradas conforme a Figura 14, foram selecionadas em ordem decrescente de abertura das malhas, sendo, 1/4"; nº4; nº8; nº16; nº30 e nº50 com aberturas respectivamente de 6,30; 4,76; 2,38; 1,19; 0,595 e 0,297 mm.

Figura 14 - Determinação da composição granulométrica



Fonte: Do autor

4.2.5 Umidade das partículas

Após a classificação das partículas, o material foi exposto ao sol para o ajuste da umidade, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Secagem das partículas



Fonte: Do autor

Considerando as condições climáticas de Ilha Solteira, a secagem ao ar livre proporcionou a obtenção da umidade abaixo de 5%, sendo realizado o ensaio de umidade em uma Balança Determinadora de Umidade, da marca Bel, com precisão de 0,0001g, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Balança Determinadora de Umidade



Fonte: Do autor

4.2.6 Massa específica das partículas

O cálculo da massa específica das partículas, se deu a partir de parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 6458 (2016) e pela ABNT NBR 6457 (2024), que utilizam o método do balão volumétrico.

Esse ensaio estabelece a utilização de um balão volumétrico N°2, com capacidade de 500ml de álcool etílico anidro 99,3°C INPM, termômetro de mercúrio com graduação de 0,1° C, no intervalo de -10°C a 100°C e uma balança de precisão.

O balão volumétrico devidamente calibrado com álcool etílico e as partículas de madeira submersas em seu interior é representado na Figura 17.

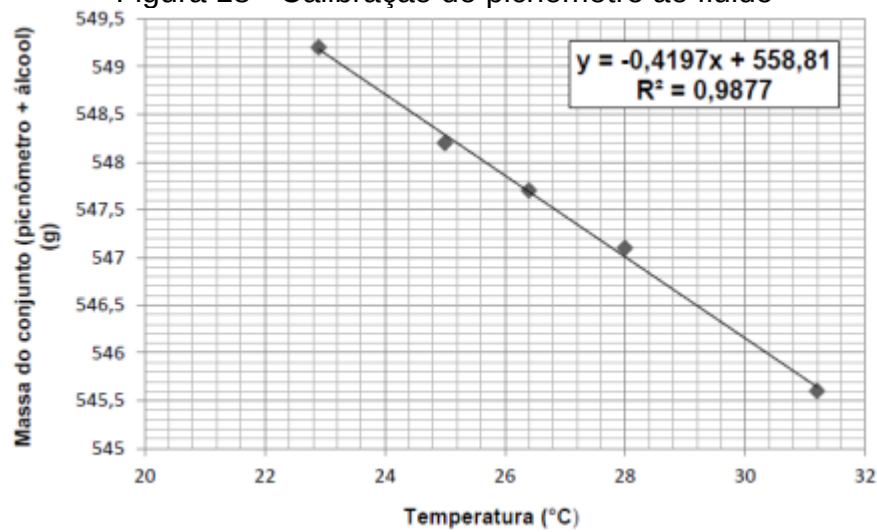
Figura 17 - Material Ensaiado no balão volumétrico



Fonte: Do autor

Para a realização do ensaio, foi necessário calibrar o fluido com base no gráfico de dispersão, representado na Figura 18, elaborado por Bispo (2020), para que fosse possível utilizar o álcool absoluto no procedimento.

Figura 18 - Calibração do picnômetro ao fluido



Fonte: Adaptado de Bispo (2020)

Após a calibração do picnômetro, a partir da Equação 1, foi determinado a massa específica das partículas de Pinus:

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

Onde:

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

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

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

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

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

Utilizando um funil de vidro como instrumento auxiliar, a massa $M1$ foi definida como a soma do material disperso contido no picnômetro e do álcool etílico adicionado ao recipiente. Com base no gráfico de calibração do picnômetro apresentado na Figura 18 anteriormente mencionada, a massa $M2$ obtida através dos valores coletados de $M1$, levando em consideração a estabilização da temperatura durante a condução do procedimento.

4.2.7 Razão de compactação

A razão de compactação é um fator significativo que estabelece uma relação dimensional entre a densidade do painel e a densidade das partículas, podendo esse valor variar entre 1,3 e 1,6, onde estabelece uma densificação e consolidação adequada ao painel, garantindo a conformação das partículas (Trianoski, 2010; Araujo *et al.*, 2019). A razão de compactação é definida através da Equação 2.

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

Onde:

Rc = razão de compactação;

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

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

4.2.8 Cálculo da massa de partículas dos painéis

Para determinar a massa total das misturas, foi necessário primeiramente determinar uma densidade nominal, no valor de 0,50 g/cm³, tendo em vista que para o Adesivo Epóxi, segundo o fabricante, possui uma densidade de 1,12 e 1,005 g/cm³, para a resina e o endurecedor, respectivamente, portanto, essa densidade nominal foi definida para que a densidade final do painel consiga se enquadrar nas normas da ABNT NBR 14810-2 (2018), que estipula para os painéis de média densidade valores entre 0,551 a 0,750 g/cm³. Para isso, utilizou-se a Equação 3.

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

Onde:

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

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

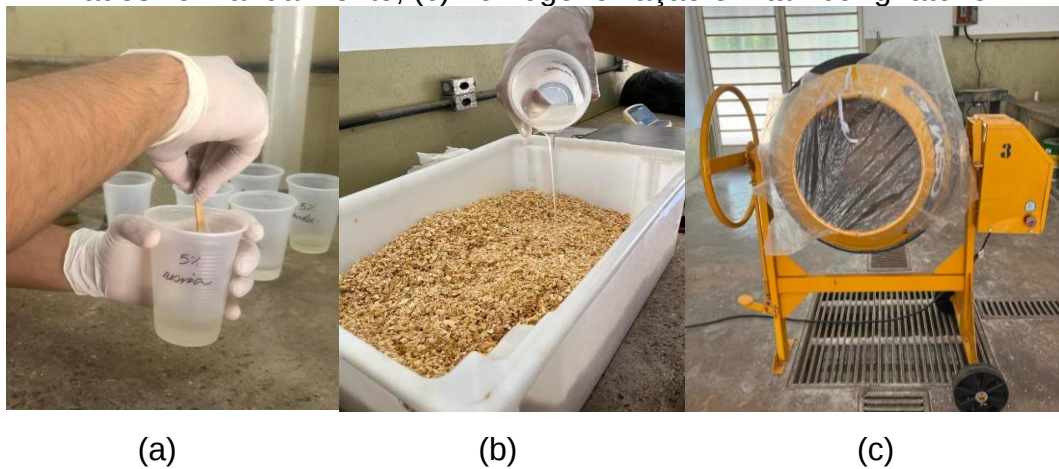
V = volume painéis (cm^3).

Para o volume total de partículas, utilizou-se as dimensões de 35x35x2 cm, que é a dimensão da formadora de colchão e da prensa hidráulica, totalizando um valor total de 2450 cm^3 . Sendo assim, a massa total utilizada para a produção dos painéis foi de 1225 g. Depois da definição da massa, as partículas e os adesivos foram pesados de acordo com as porcentagens estabelecidas em cada mistura.

4.2.9 Produção dos painéis

Para os painéis produzidos com o Adesivo Epóxi, foi necessário primeiramente a homogeneização da Resina com o Endurecedor, onde o fabricante estipula que seja misturado com a proporção de 2:1 durante 5 minutos de forma manual. Em seguida, o adesivo é adicionado às partículas e o conjunto é homogeneizado manualmente para uma primeira impregnação, posteriormente a mistura é levada até o tambor giratório por mais 5 minutos para a homogeneização final, sequência ilustrada conforme Figura 19.

Figura 19 - (a) homogeneização da resina com endurecedor, (b) homogeneização do adesivo manualmente, (c) homogeneização em tambor giratório

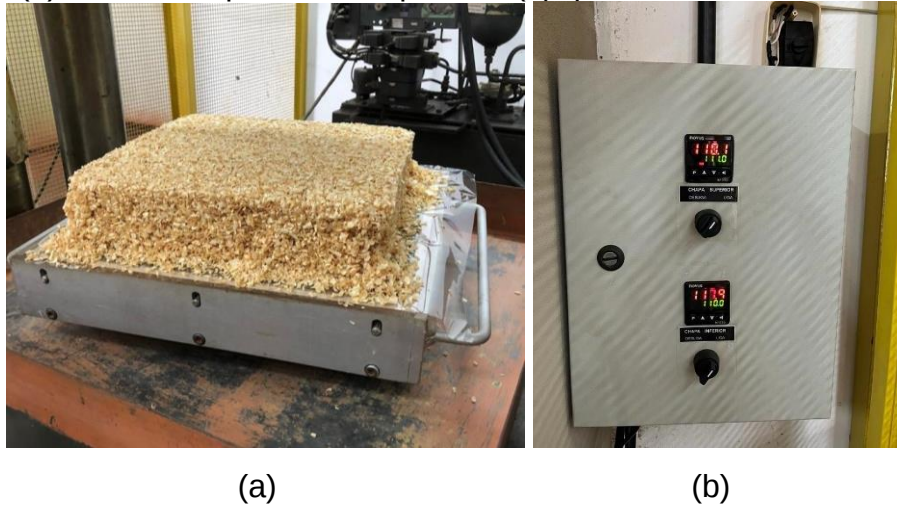


Fonte: Do autor

Após a realização da homogeneização da mistura, deu-se início a preparação do colchão de partículas, depositando o material na formadora de colchão, com dimensões de 35x35 cm e realizando a prensagem a frio.

Em seguida, o colchão foi depositado entre os pratos da prensa com controle de pressão e temperatura conforme Figura 20. Os painéis foram produzidos com pressão de 5 Mpa e com uma pequena variação de temperatura, limitada a 110°C. O procedimento foi realizado em 10 minutos divididos em duas etapas. A primeira inicialmente com 5 minutos de prensagem, com alívio de pressão por 30 segundos, para evitar a concentração de gases e a formação de bolhas no interior dos painéis, procedimento adotado por Cazella (2022), Souza (2022) e Gilio (2020).

Figura 20 - (a) material depositado na prensa, (b) quadro de controle de temperatura



Fonte: Do autor

Após a prensagem, os painéis ficaram durante 7 dias em local coberto à temperatura ambiente, para que houvesse a cura total da resina, conforme estipulado pelo fabricante do adesivo. A Figura 21 ilustra os painéis Epóxi aguardando o seu tempo de cura.

Figura 21 - Paineis Epóxi



Fonte: Do autor

4.2.10 Preparação dos corpos de provas

Após o tempo de cura, realizou-se o esquadrejamento dos painéis para a obtenção dos corpos de prova (cps) com dimensões de 350x50 mm para o ensaio de Resistência à Flexão Estática, e em seguida cps nas dimensões de 50x50 mm para os

demais ensaios de Tração Perpendicular (TP), Densidade (D), Inchamento (I), Absorção (A) e Umidade (U).

4.3 ENSAIOS FÍSICOS

Ao analisar um material, certas características associadas às suas propriedades são cruciais para determinar a qualidade final de um produto. Segundo Budinski (2009), as propriedades físicas dos materiais são características intrínsecas que descrevem como um material se comporta sob condições específicas sem alterar sua composição química. Essas propriedades são essenciais para avaliar a adequação de um material para diferentes aplicações. Além disso, essas propriedades influenciam diretamente a performance, durabilidade e eficiência dos materiais em diversas aplicações industriais e tecnológicas

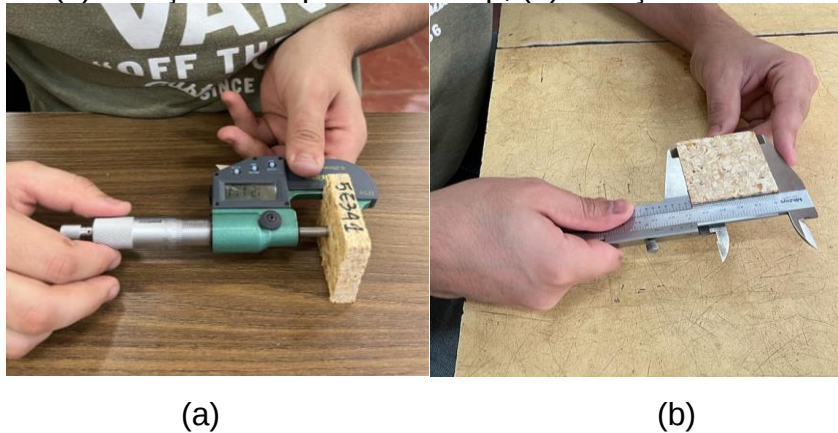
Para a realização dos ensaios físicos de Densidade (D), Inchamento 24h (I), Absorção 24h (A) e Teor de Umidade (TU) foram realizados com base na norma ABNT NBR 14810-2 (2018).

4.3.1 Densidade (D)

Com base na ABNT NBR 14810-2 (2018), foram utilizados 10 cps para cada mistura, aferindo as dimensões de cada cp utilizando micrômetro (precisão 0,001 mm), paquímetro (precisão 0,1 mm) e balança (precisão 0,1 g), conforme ilustrado na Figura 22.

A densidade é um parâmetro relevante pois é ela quem vai definir o documento normativo apropriado de acordo com a classificação dos materiais (Nascimento *et al.*, 2015).

Figura 22 - (a) aferição da espessura do cp, (b) aferição das arestas do cp



Fonte: Do autor

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

$$V = b1 \times b2 \times e \quad (4)$$

Onde:

V = volume do cp (mm^3);

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

e = espessura do cp (mm).

Com as massas aferidas e os volumes calculados, a densidade dos cps foi obtida através da Equação 5:

$$D = \frac{M}{V} \times 1.000 \quad (5)$$

Onde:

D = densidade do cp (g/cm^3);

M = massa do cp (g);

V = volume do cp (mm^3).

Para o cálculo da densidade média de cada mistura, foi utilizado a Equação 6, considerando o coeficiente de variação percentual da densidade de cada cp em relação à densidade média dos painéis de cada mistura.

$$D\% = \frac{D - D_{média}}{D_{média}} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

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

D = densidade do cp (g/cm^3);

$D_{média}$ = densidade média dos cps (g/cm^3)

4.3.2 Teor de umidade (U)

O ensaio do Teor de Umidade possui relevância em relação às propriedades finais dos painéis, maiores valores de teor de umidade implicam em reduções nas propriedades finais dos painéis, tal como as propriedades físicas e mecânica (Nascimento *et al.*, 2015).

Para realizar a determinação do teor de umidade, foram empregados 10 corpos de prova para cada composição proposta, com dimensões aproximadas de 50 x 50 mm. A fim de obter a massa inicial dos corpos de prova, foi utilizada uma balança de precisão com incremento de 0,01 g.

Em sequência, procedeu-se à etapa de secagem dos corpos de prova em uma estufa, cuja temperatura foi mantida a $103 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$. Após a secagem e esfriamento foi aferida a massa seca (massa final) de cada cp, calculando então de acordo com a Equação 7 o seu teor de umidade.

$$U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

U = teor de umidade do cp (%);

M_u = massa úmida do cp (g);

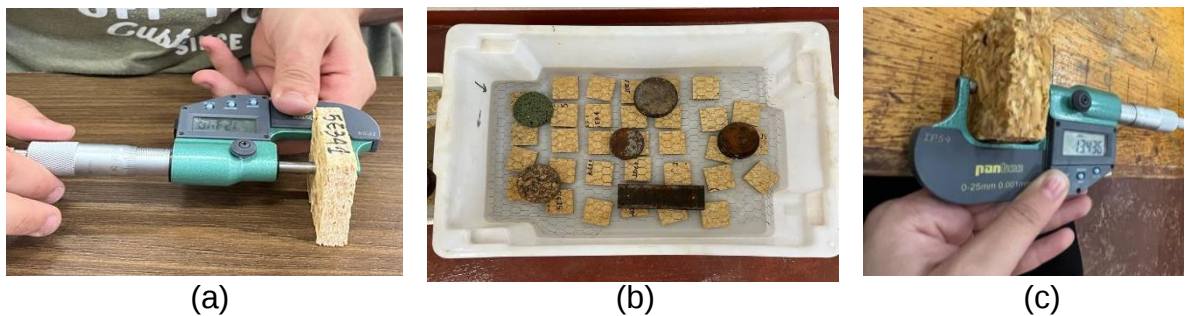
M_s = massa seca do cp (g).

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

Para realizar a determinação do inchamento em espessura após 24 horas, foram utilizados 10 corpos de prova para cada composição proposta. Os corpos de prova foram imersos em água deionizada, utilizando um recipiente de PVC e telas metálicas com pesos para garantir que os corpos de prova permanecessem submersos com uma lâmina de água de 25 mm (Figura 23b). Após 24 horas, realizou-se a medição da espessura dos corpos de prova novamente (Figura 23c).

Os valores obtidos através do ensaio são fundamentais para determinar a viabilidade de utilização dos painéis em ambientes internos e externos (Iwakiri, 2005).

Figura 23 - (a) Aferição da espessura inicial, (b) cps submersos em água deionizada, (c) aferição da espessura final



Fonte: Do autor

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

$$I = \frac{E_f - E_i}{E_i} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

I = inchamento em espessura do cp (%);

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

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

$$A = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

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

Mu = massa úmida do cp (g);

Ms = massa seca do cp (g).

4.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Segundo Callister (2002), a definição de propriedade mecânica abrange as características intrínsecas de um material que determinam seu comportamento quando submetido a forças ou cargas externas. Essas propriedades são essenciais para compreender como um material reage a diversas condições de uso, incluindo tensão, compressão, flexão e torção. Para determinar essas propriedades, são realizados ensaios mecânicos, que são métodos experimentais fundamentais para a caracterização do comportamento dos materiais. A relação entre ensaios mecânicos e propriedades mecânicas é direta e fundamental, pois esses ensaios fornecem os dados necessários para descrever o desempenho do material sob diferentes condições de carga.

Os ensaios mecânicos foram realizados no Núcleo de Ensino e Pesquisa em Alvenaria Estrutural – NEPAE, no Campus central da FEIS – UNESP. Os ensaios mecânicos para a determinação do módulo de resistência à flexão estática (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e resistência à tração perpendicular (TP) foram conduzidos utilizando a máquina universal de ensaios EMIC GR048, com uma capacidade

máxima de 300 kN, seguindo as diretrizes estabelecidas na norma ABNT NBR 14810-2 (2018).

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

A flexão estática refere-se ao ensaio no qual uma força é aplicada no ponto central de uma amostra de material, enquanto suas extremidades são apoiadas. Este ensaio é fundamental para determinar a resistência à flexão, ou módulo de ruptura, e o módulo de elasticidade em flexão do material. Durante o teste, a amostra é submetida a uma combinação de tensões de compressão e tração até que ocorra a ruptura ou uma deformação permanente (Callister, 2002).

O ensaio de flexão estática se deu pelo rompimento do cp à flexão, conforme Figura 24, onde são extraídos 10 cps de dimensões de 350x50xe mm, com a sua espessura (e) variando entre 11 e 14 mm, onde o cp é bi apoiado com a distância entre apoios calculado de acordo com a Equação 10.

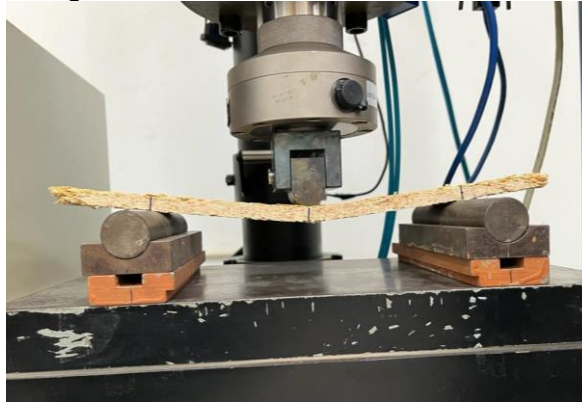
$$D = 20 \times e \quad (10)$$

Onde:

D = distância entre apoios do aparelho (mm);

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

Figura 24 - Ensaio de flexão estática



Fonte: Do autor

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

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

Onde:

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

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

D = distância entre apoios do aparelho (mm);

B = largura do cp (mm);

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

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

Onde:

MOE = módulo de elasticidade (MPa);

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

D = distância entre apoios do aparelho (mm);

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

B = largura do cp (mm);

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

4.4.2 Resistência à Tração Perpendicular (TP)

Para a determinação da Resistência à Tração Perpendicular, foram utilizados os cps com dimensões de 50 x 50 mm, tendo a espessura variada de acordo com o seu tratamento.

Primeiramente foi necessário regularizar a superfície dos cps, utilizando uma lixadeira, conforme ilustrado na Figura 25, a fim de obter faces retificadas e planas. Em seguida, os cps foram limpos com ar comprimido para garantir que as suas superfícies estivessem livres de pó, evitando comprometer a adesão entre a madeira e o suporte metálico.

Figura 25 - Lixadeira para regularização das faces dos cps



Fonte: Do autor

Em relação aos suportes metálicos, eles foram submetidos primeiramente a uma limpeza, lixando a sua superfície com uma esmerilhadeira e em seguida utilizando uma ferramenta lima para deixar a sua superfície rugosa, propiciando uma melhor aderência entre a cola, o cp e o suporte metálico, conforme ilustrado na Figura 26. Por fim, os suportes metálicos foram limpos com Thinner nas suas superfícies, garantindo então a sua limpeza completa.

Figura 26 - Preparação do corpo metálico (a), (b) e (c)



(a)

(b)

(c)

Fonte: Do autor

A colagem dos cps aos suportes metálicos se deu com a utilização do adesivo epóxi Araldite Profissional 90 minutos (Figura 27), com secagem inicial de 90 minutos e cura total em 24h.

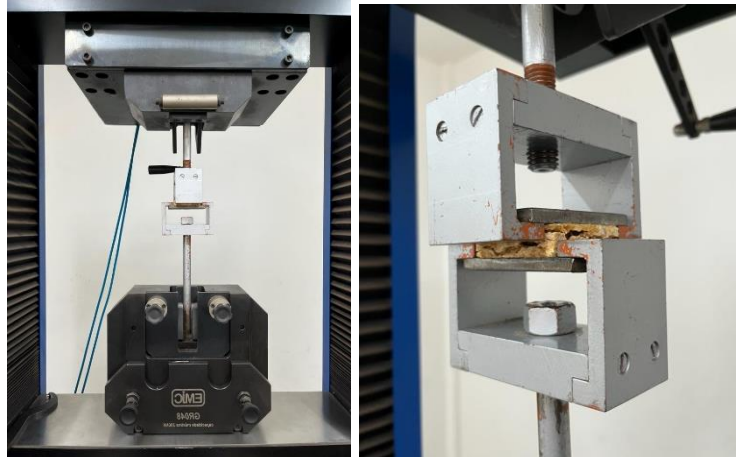
Figura 27 - Cola utilizada para colar o cp ao suporte metálico



Fonte: Do autor

Após as 24h, os corpos de provas foram submetidos ao ensaio de Resistência à Tração Perpendicular, utilizando a máquina universal de ensaios, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 - (a) máquina universal de ensaios EMIC, (b) cp ao fim do estágio do ensaio de TP



Fonte: Do autor

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

$$TP = \frac{P}{S} \quad (13)$$

$$S = b1 \times b2 \quad (14)$$

Onde:

TP = resistência à tração perpendicular (MPa);

P = carga de ruptura (N);

S = área da superfície do cp (mm²);

$b1$ = dimensão do cp (mm);

$b2$ = dimensão do cp (mm).

4.5 MICROSCOPIA ELETÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O ensaio de MEV tem como objetivo analisar a interação microscópica entre o epóxi com as partículas de madeira, procurando evidências do comportamento do

adesivo a partir da temperatura de prensagem bem como a pressão utilizada. Além de buscar essas possíveis referências, o ensaio também busca estudar o envelopamento das partículas a partir do aumento do acréscimo do adesivo epóxi.

Para a realização do ensaio, a análise realizada se deu na região de ruptura dos cps, com dimensões de 1 x 1 x 0,4 cm, onde as amostras foram fixadas com fita adesiva dupla face de carbono através da "porta Stub" e revestidas com uma fina camada de ouro, utilizando o equipamento Quorum, modelo Q150TE. Em seguida, foram encaminhadas ao equipamento ZEISS, modelo EVO LS15, equipado com EDS da OXFORD Instruments, modelo INCAx-act, para a realização da análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Todos os procedimentos foram conduzidos no Departamento de Física e Química (DFQ), localizado no Campus da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), da Universidade Estadual Paulista (UNESP).

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Uma análise estatística dos resultados utilizando o teste de contraste de médias Tukey com 5% de significância, o teste de normalidade Anderson-Darling (5% de significância) para a validação da análise de variância (ANOVA, 5% de significância) foi realizada a fim de avaliar a influência do acréscimo da resina epóxi (5, 10 e 15%) nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis fabricados.

No teste de Tukey, a letra "A" representa a mistura associada ao maior valor médio, enquanto a letra "B" representa o segundo maior valor médio, e assim por diante. Letras idênticas indicam misturas com médias de resultados estatisticamente equivalentes entre si. É importante ressaltar que, para essas análises, assim como no cálculo das estatísticas descritivas, foram obtidos dez valores experimentais para cada propriedade dos tipos de mistura.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS

5.1.1 Teor de umidade das partículas

Os dados referentes aos teores de umidade médio das partículas para os tratamentos estudados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Teor de umidade das partículas de Pinus

Partícula	Teor de umidade médio (%)
Pinus	4,21

Fonte: Elaborado pelo autor

Tendo em vista que para a produção de painéis aglomerados com outros adesivos, estudos visam trabalhar com uma umidade das partículas abaixo de 5%, pois, quanto menor a sua umidade, melhor será a sua adesão, consequentemente, melhorando as propriedades finais dos painéis. Assim, Jin *et al* (2015) esclarece que compósitos epóxi podem ser usados como protetores a umidade, em decorrência disso, esse trabalho visou trabalhar com teores de partículas abaixo de 5%.

5.1.2 Massa específica das partículas

O valor obtido da massa específica por meio do ensaio, são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Massa específica das partículas

Partícula	Massa específica da partícula (g/cm³)
Pinus	0,57

Fonte: Elaborado pelo autor

O valor encontrado para as partículas de Pinus é semelhante ao estabelecido pela ABNT NBR 7190 (2022), que estipula um valor aproximado de 0,56 g/cm³ de massa específica aparente.

5.1.3 Razão de compactação

A Tabela 7 apresenta os valores obtidos para o índice de compactação, que é determinado pela razão entre a densidade média dos painéis e a massa específica das partículas.

Tabela 7 - Índice de compactação das misturas

Mistura	D (g/cm³)	ps (g/cm³)	Índice de compactação
5EP	0,845	0,57	1,48
10EP	0,883	0,57	1,55
15EP	0,895	0,57	1,57

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores do índice de compactação encontrados se enquadram nos limites estabelecidos por Araujo *et al* (2019) e Trianoski (2010), que estipulam valores entre o intervalo de 1,3 a 1,6. Sendo assim, os painéis tiveram uma boa compactação e densificação.

5.1.4 Determinação granulométrica

Com base na literatura, a geometria das partículas tem grande importância para as propriedades finais dos painéis, a partir dela, é possível ajustar os comprimentos e as quantidades das partículas, bem como o módulo de finura das misturas.

Resumidamente, constatou-se que as partículas de Pinus ficaram retidas principalmente nas peneiras de número 8 e 16, com aberturas de 2,38 e 1,19 mm, respectivamente, conforme observado na Tabela 8, que são as dimensões que apresentaram maior eficiência no processo de moagem.

Tabela 8 - Resultados do ensaio granulométrico

Peneira Nº	Abertura (mm)	Massa retida média (g)	Retido (%)	Massa retida acumulada (g)	Retido acumu- lado (%)
1/4"	6,30	0,41	1,18	0,41	1,18
4	4,76	2,31	6,59	2,72	7,77
8	2,38	23,28	66,52	26,00	74,30
16	1,19	8,60	24,56	34,60	98,86
30	0,60	0,33	0,93	34,93	99,79
50	0,30	0,00	0,00	34,93	99,79
Fundo	-	0,00	-	-	-
Perdas (g)	-	0,07	0,21	-	-
MF	-	-	-	-	3,81

Fonte: Elaborado pelo autor

A peneira de número 4, com malha de 4,76, obteve a terceira maior porcentagem de material retido, com 6,59%, enquanto as outras peneiras referidas tiveram nº8 (66,52%) e nº 16 (24,56%).

Observando a Tabela 8, da massa total ensaiada de 35g, as 3 peneiras referidas tiveram uma porcentagem retirada de 97,67%, com MF igual a 3,81. Observa-se também que as massas retidas na peneira de número 50, com abertura de 0,30 e fundo, foram nulas, não exercendo influência nas composições granulométrica das misturas.

Resultados semelhantes foram encontrados na pesquisa de Cazella (2022), que trabalhou com a mesma espécie de pinus, onde a maior porcentagem de massa retida se deu nas mesmas peneiras referidas.

5.2 ENSAIOS FÍSICOS

Na Tabela 9 são apresentados os resultados médios (X_m), os coeficientes de variação (CV), o valor-p do teste de normalidade de Anderson-Darling (5% de significância) para a validação da análise de variância (ANOVA, 5% de significância) e os resultados do teste de contraste de média de Tukey (5% de significância) acerca das propriedades físicas dos painéis fabricados com 5, 10 e 15% de adesivo epóxi.

Tabela 9 - Análise estatística e propriedades físicas dos painéis

Prop.	Teores de Epóxi						p-valor (AD)
	5%		10%		15%		
	X _m	CV (%)	X _m	CV (%)	X _m	CV (%)	
ρ (g/cm ³)	0.84 B	2.49	0.88 A	2.96	0.89 A	5.19	0.341
A (%)	102.34 A	6.87	51.94 B	11.37	38.64 C	6.75	0.523
I (%)	55.53 A	10.08	28.45 B	11.79	15.84 C	6.44	0.064
TU (%)	7.89 A	7.11	7.59 A	5.09	6.80 B	4.77	0.473

Fonte: Elaborado pelo autor

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

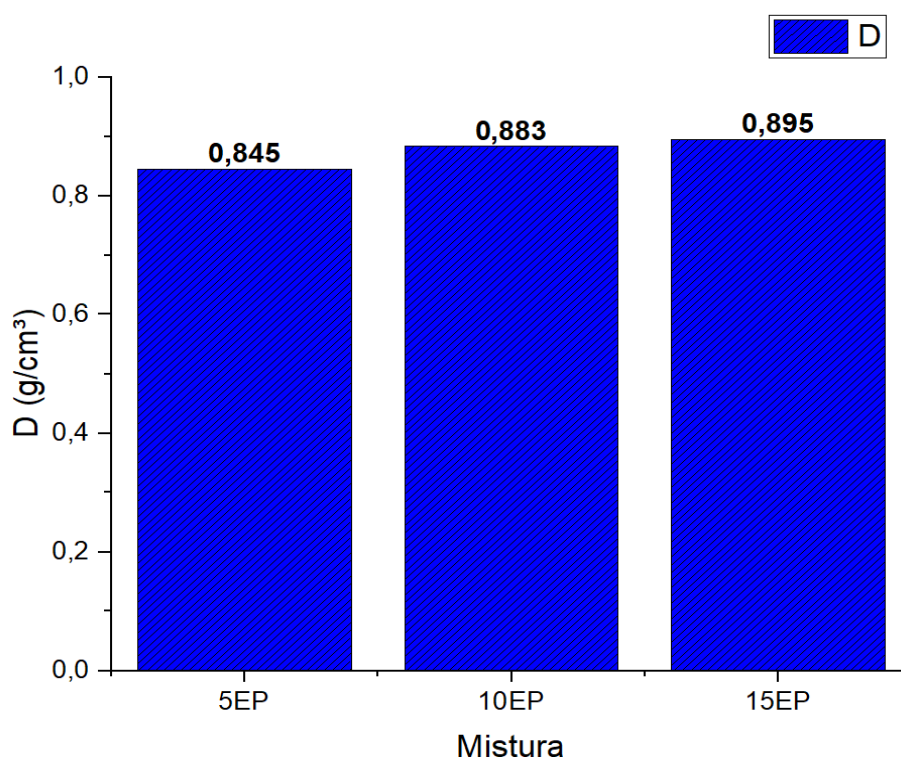
A ABNT NBR 14810-2 (2018), estipula que para painéis de baixa densidade, os valores correspondentes devem estar abaixo de 0,551 g/cm³, para os de média densidade, entre 0,551 e 0,750 g/cm³ e para alta densidade, acima de 0,750 g/cm³. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos.

Assim, os valores de densidade obtidos apresentam um valor superior ao estabelecido pela norma, mesmo utilizando uma densidade nominal de 0,5 g/cm³, conforme demonstrado no item 3.3.7, podendo ser classificados como painéis de alta densidade. Esses resultados ocorreram pelo fato de que a Resina Epóxi possui uma massa específica maior que a da madeira Pinus, conforme apresentado no item 4.2.5, com um valor de aproximado de 1,12 g/cm³ e o Endurecedor com um valor de 1,005 g/cm³.

A partir da Figura 29, observa-se que conforme houvesse o acréscimo da porcentagem da resina, maior a sua densidade, tendo um aumento de 4,49% da mistura 100P 5EP para 100P 10EP, e de 1,35% da mistura 100P 10EP para 100P 15EP, podendo ser considerados os valores de 10EP e 15EP equivalentes estatisticamente (Tabela 9).

No estudo exploratório realizado (Herradon *et al.*, 2023), com painéis aglomerados de Pinus prensados a 4 MPa, 10 minutos e 110°C, constatou que o acréscimo da densidade entre os painéis com 10 e 15% de epóxi foram de 0,80 e 0,85 g/cm³, respectivamente. Isso indica que o aumento da pressão de prensagem contribui para o aumento da densidade do painel.

Figura 29 - Densidade média dos painéis



Fonte: Do autor

Em relação aos resultados de Inchamento e Absorção, foi possível concluir que conforme o aumento da porcentagem da resina epóxi, melhor o seu condicionamento em ambos os ensaios, a Figura 30 ilustra os cps após ensaio e a Figura 31 os dados obtidos.

Para os resultados de Absorção, o acréscimo do epóxi demonstrou ser não equivalente de acordo com o teste Tukey (Tabela 9), porém estando um pouco acima do p-valor de normalidade esperado. A redução da absorção entre a mistura 5EP e 10EP foi de aproximadamente 49,25%, enquanto entre as misturas 10EP e 15EP foi de 25,61%.

No estudo exploratório (Herradon *et al.*, 2023) com uma pressão de prensagem de (4 MPa), obteve-se resultados diferentes estatísticos, sendo o de 10% de epóxi

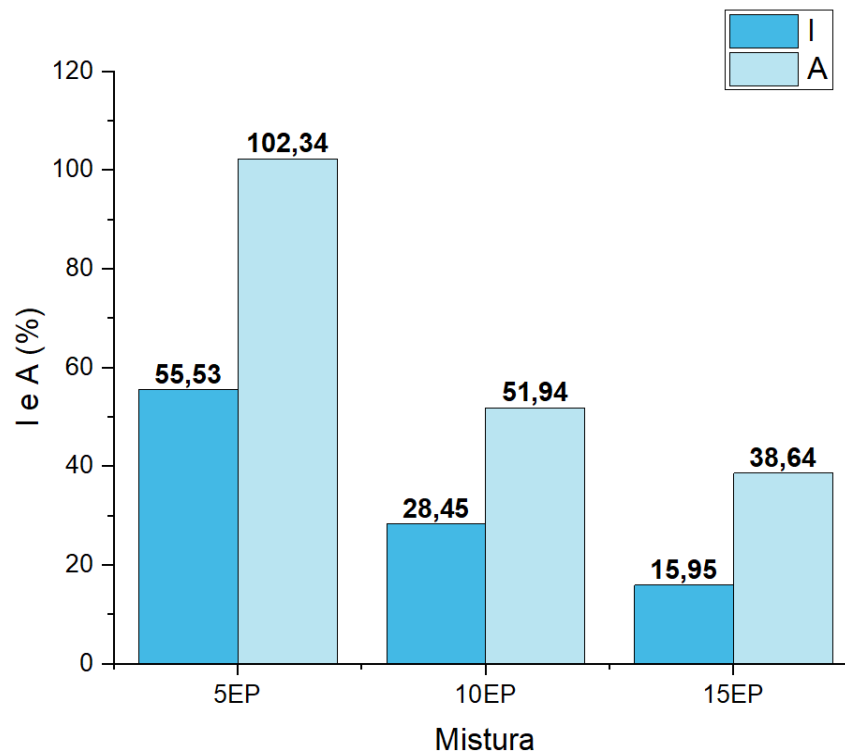
considerado A enquanto o de 15% epóxi C, o que comprova que um aumento na pressão de prensagem aproxima a diferença estatística entre eles.

Figura 30 - cps após o ensaio de Inchamento e absorção 24h



Fonte: Do autor

Figura 31 - Inchamento em espessura 24h e Absorção após 24h



Fonte: Do autor

Em relação aos valores obtidos para o ensaio de Inchamento após 24h, o teste Tukey (Tabela 9) implica que o acréscimo do epóxi melhorou as propriedades do painel, apresentando diferença significativa entre as 3 porcentagens. Ainda, a redução do Inchamento entre as misturas foi de 48,77% para 5EP e 10EP, e, 44,36% entre 10EP e 15EP.

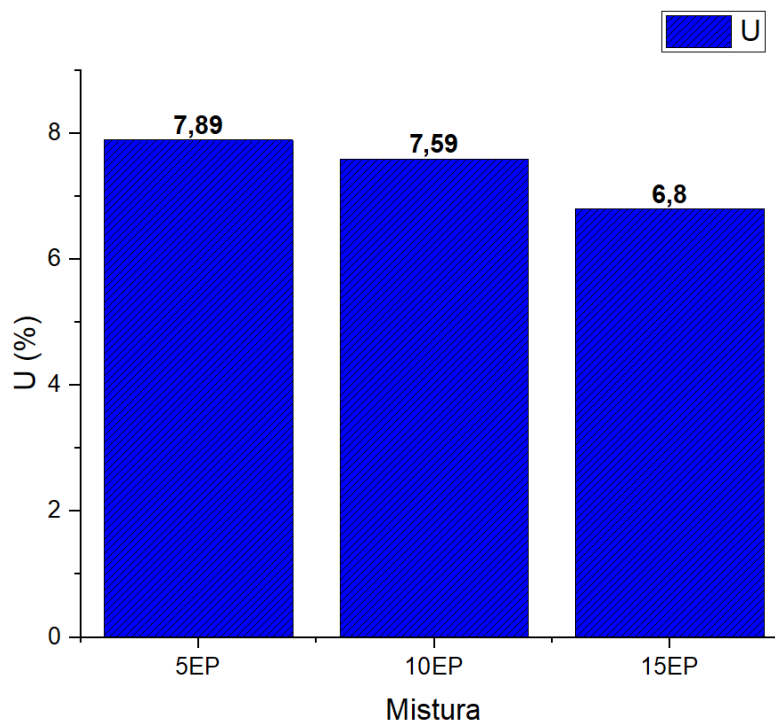
Os resultados obtidos no estudo exploratório (Herradon *et al.*, 2023), a utilização de 4 MPa para a pressão de prensagem também apresentou valores estatísticos diferentes, sendo de 48,03% para 10% de epóxi e 25,55% para 15% de epóxi.

Para os valores de Teor de Umidade (TU), as misturas de 5EP (7,89%) e 10EP (7,59%) obtiveram resultados equivalentes de acordo com a análise estatística, mesmo o de 10EP obtendo uma redução. Já entre 10EP e 15EP (6,8%), foram diferentes estatisticamente.

A ABNT NBR 14810-2 (2018), estipula que o teor de umidade dos painéis deve se encontrar no intervalo de 5 a 13%, portanto, todas as misturas tiveram resultados satisfatórios.

Na Figura 32 podemos observar que conforme o acréscimo da Resina Epóxi, melhor o teor de umidade encontrado no ensaio. Jin *et al* (2015) ressalta em sua pesquisa que compósitos epóxi são materiais com capacidade de proteger componentes elétricos contra a umidade, e que eles também podem proteger em condições ambientes diversas, como temperatura, radiação e danos mecânicos e físicos.

Figura 32 - Teor de umidade médio dos painéis



Fonte: Do autor

Tabela 10 - Comparativo dos resultados físicos com a literatura de Pinus e UF

Autor (es)	Teor de adesivo UF (%)	Condições de prensagem			Resultados físicos	
		Pressão (MPa)	Temp. (°C)	Tempo (min)	I24h (%)	A24h (%)
5EP	5	5,00	110	10	55,53	102,34
10EP	10	5,00	110	10	28,45	51,94
15EP	15	5,00	110	10	15,84	38,64
Sozim <i>et al</i> (2019)	10	3,92	160	8	31,47	90,02
Iwakiri <i>et al</i> (2014)	10	4,00	160	8	22,00	52,00
Carvalho <i>et al</i> (2014)	10	3,00	180	9	34,80	93,70
Sanches <i>et al</i> (2016)	10	4,00	160	8	-	-
Cassia <i>et al</i> (2009)	8	3,20	170	8	24,07	88,90

Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando a Tabela 10, quando comparado a pesquisas que utilizaram a UF, as misturas com 10EP e 15EP obtiveram melhores resultados para o ensaio de Absorção, enquanto a mistura de 5EP foi inferior à resina UF. Em relação ao ensaio de

Inchamento após 24h, a mistura 5EP mais uma vez foi inferior aos resultados que utilizaram a UF, já a mistura 15EP foi superior a todas as outras, enquanto a mistura 10EP foi superior apenas as pesquisas de Carvalho *et al* (2014) e Sanches *et al* (2016).

5.3 ENSAIOS MECÂNICOS

Na Tabela 11 são apresentados os resultados médios (X_m), os coeficientes de variação (CV), o valor-p do teste de normalidade de Anderson-Darling (5% de significância) para a validação da análise de variância (ANOVA, 5% de significância) e os resultados do teste de contraste de média de Tukey (5% de significância) acerca das propriedades físicas dos painéis fabricados com 5, 10 e 15% de adesivo epóxi.

Tabela 11 - Análise estatística e propriedades mecânica dos painéis

Prop.	Teores de Epóxi						p-valor (AD)
	5%		10%		15%		
	X _m	CV (%)	X _m	CV (%)	X _m	CV (%)	
MOR (MPa)	9.05 C	9.80	16.52 B	8.97	26.92 A	8.66	0.261
MOE (MPa)	1354 C	12.93	2679 B	12.47	3051 A	5.43	0.063
TP (MPa)	0.30 C	22.61	1.01 B	10.84	1.43 A	5.75	0.452

Fonte: Elaborado pelo autor

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

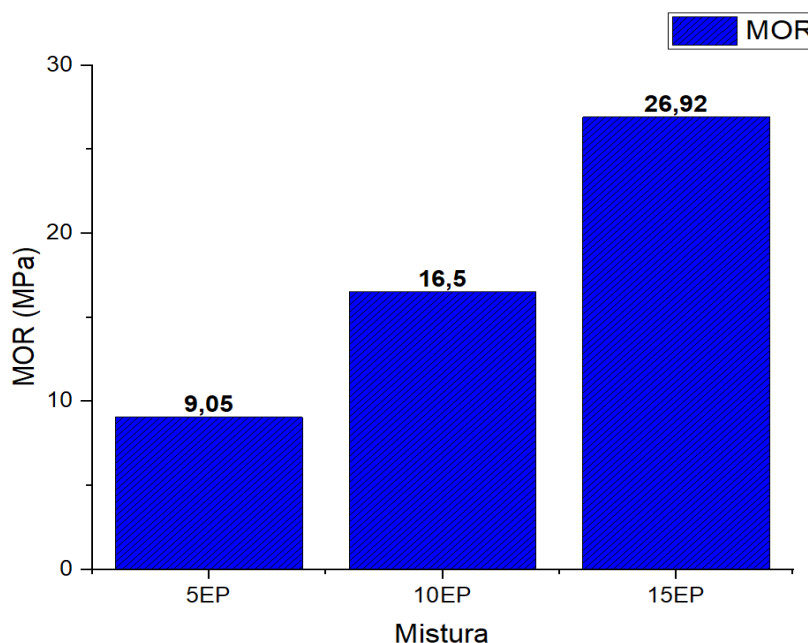
Estatisticamente falando, as misturas possuem valores médios não equivalentes entre si (C – 5EP, B – 10EP e A – 15EP). Além disso, todas as misturas se enquadram no teste de normalidade -valor, com 5% de significância.

Observa-se que conforme fosse aumentado o teor de resina epóxi, melhores foram os resultados obtidos para todos os ensaios. Isso ocorre, pois, aumentando a porcentagem de adesivo, uma maior área superficial de partículas adere ao adesivo, trazendo então, melhores propriedades físicas e mecânicas ao painel.

Para o ensaio de Módulo de Ruptura (MOR), houve resultados estatísticos com diferenças significativas para cada tipo de porcentagem de Resina Epóxi empregada, um salto de 82,54% quando analisado de 5EP (9,05 MPa) para 10EP (16,52 MPa) e

um salto de 62,95% quando analisado 10EP (16,52 MPa) para 15EP (26,92 MPa). A Figura 33 ilustra esse acréscimo.

Figura 33 - Valores médios de MOR

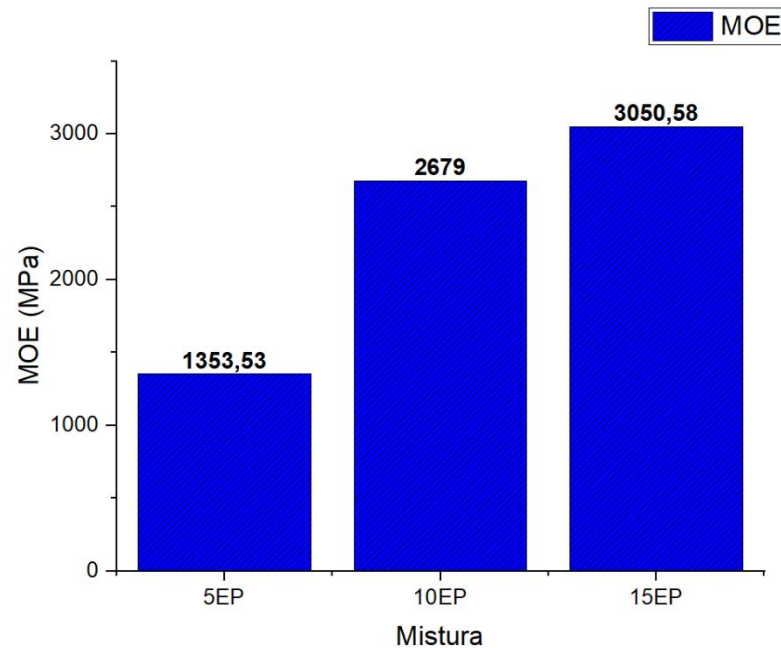


Fonte: Do autor

Quando comparado com os resultados obtidos a partir do estudo exploratório, com 4 MPa (Herradon *et al.*, 2023), o resultado obtido a partir do MOR para 10% de epóxi foi de 5,37 MPa e 9,8 MPa para 15% de epóxi, o que indica que o acréscimo da pressão de prensagem melhorou significativamente a resistência dos painéis, sendo de aproximadamente 207,61% de aumento de resistência entre os painéis com 10% de epóxi e, 174,7% entre os painéis de 15% de epóxi.

Analisando os resultados de Módulo de Elasticidade (MOE), a Tabela 11 mostra que mais uma vez, houve saltos significativos de resistência conforme fosse aumentado o teor de adesivo. Um aumento de resistência de 97,85% quando analisado de 5EP (1325 MPa) para 10EP (2679 MPa), e um aumento não tão significativo de 13,89% de 10EP (2679 MPa) para 15EP (3051 MPa). A Figura 34 ilustra os resultados.

Figura 34 - Valores médios de MOE

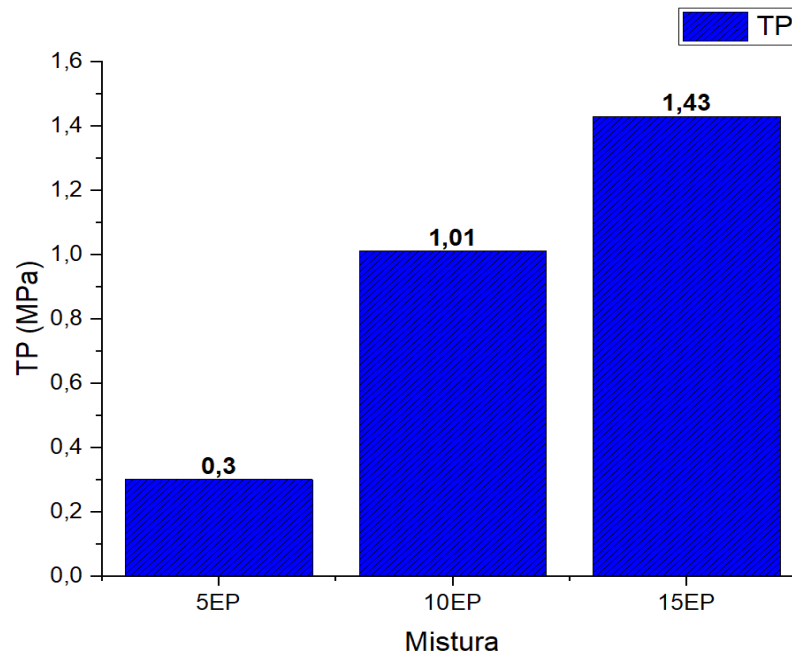


Fonte: Do autor

Os resultados encontrados no estudo exploratório (Herradon *et al.*, 2023), com 4 MPa, os valores foram inferiores quando comparados com a presente pesquisa, de 614 MPa para 10% de epóxi e 1243 MPa para 15% de epóxi. Sendo o de 5EP (1354 MPa) da presente pesquisa superior ao de 15% de epóxi com 4 MPa.

Por fim, a análise dos resultados para o ensaio de Tração Perpendicular (TP) da Tabela 11, podemos concluir que os valores são estatisticamente diferentes (C, B e A respectivamente para 5EP, 10EP e 15EP), com um salto de resistência de 236,67% entre 5EP (0,30 MPa) e 10EP (1,01 MPa) e, 41,58% entre 10EP (1,01 MPa) e 15EP (1,43 MPa). A Figura 35 ilustra os resultados obtidos.

Figura 35 - Valores médios de TP



Fonte: Do autor

Quando comparado aos resultados exploratórios (Herradon *et al.*, 2023) de 4 MPa, o ganho da resistência ao utilizar uma pressão de prensagem não foi tão significativo assim, sendo o valor para 10% de epóxi resultando em 0,64 MPa e o valor para 15% de epóxi de 1,31 MPa, valores que podem ser considerados aproximados para os casos com 15% de epóxi.

A Tabela 12 mostra os valores coletados a partir da literatura de painéis aglomerados produzidos a partir de Pinus e UF comparados com o da presente pesquisa.

Tabela 12 - Comparativo dos resultados mecânicos com a literatura de Pinus e UF

Autor(es)	Teor de adesivo UF (%)	Condições de prensagem			Resultados mecânicos		
		Pressão (MPa)	Temp. (°C)	Tempo (min)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P. (MPa)
5EP	5	5,00	110	10	9,05	1354	0,30
10EP	10	5,00	110	10	16,52	2679	1,01
15EP	15	5,00	110	10	26,92	3051	1,43
Sozim <i>et al</i> (2019)	10	3,92	160	8	7,58	870	0,65
Iwakiri <i>et al</i> (2014)	10	4,00	160	8	12,78	1847	0,58
Carvalho <i>et al</i> (2014)	10	3,00	180	9	9,18	1165,5	1,05
Sanches <i>et al</i> (2016)	10	4,00	160	8	9,46	1039,1	1,24
Cassia <i>et al</i> (2009)	8	3,20	170	8	19,96	2329	0,78

Fonte: Elaborado pelo autor

Podemos observar que, ao analisar o ensaio de MOR, a mistura 5EP foi superior apenas a pesquisa de Sozim *et al* (2019), mesmo trabalhando com a metade da porcentagem de adesivo. Já a mistura 10EP foi superior a todas a quase todas as pesquisas, obtendo resultado inferior apenas a pesquisa de Cassia *et al* (2009). Já a mistura de 15EP foi superior a todos os resultados da literatura.

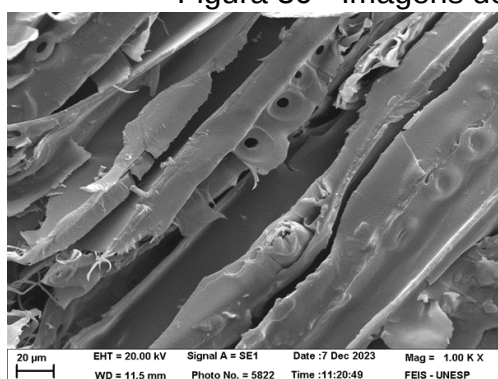
Analisando os resultados de MOE, a mistura de 5EP só não foi superior as pesquisas de Iwakiri *et al* (2014) e Cassia *et al* (2009), já as demais misturas 10EP e 15EP foram superiores a todos os resultados da literatura.

Por fim, ao analisar os resultados de TP, a mistura 5EP foi a que obteve os piores resultados, enquanto a de 10EP foi inferior a apenas as pesquisas de Carvalho *et al* (2014) e Sanches *et al* (2016). A mistura 15EP foi superior a todas as pesquisas da literatura.

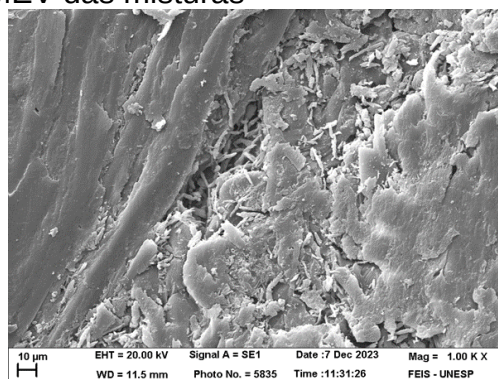
5.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Através das micrografias obtidas por MEV, foi possível observar a superfície dos corpos de prova de cada mistura após a ruptura nos ensaios mecânicos, destacando a interação entre as partículas de madeira e o epóxi. A Figura 36 ilustra os resultados de cada mistura.

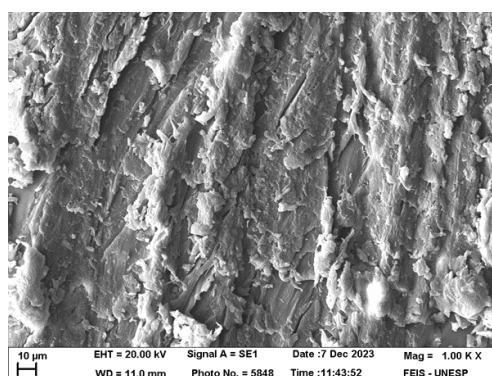
Figura 36 - Imagens de MEV das misturas



(a) Superfície do cp da mistura
5EP



(b) Superfície do cp da mistura
10EP



(c) Superfície do cp da mistura
15EP

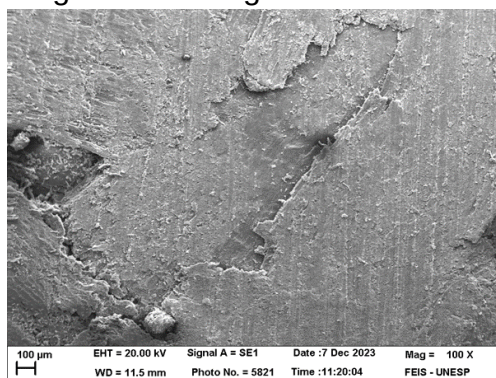
Fonte: Do autor

Ao analisar as imagens observa-se que existe um preenchimento gradativo dos espaços vazios que é formado pelas partículas conforme o teor de adesivo foi acrescentado, justificando o aumento da sua densidade. Uma alta quantidade de espaços vazios pode colaborar para a percolação da água, o que acaba reduzindo a resistência do painel em relação a umidade, inchamento e absorção, conforme os resultados físicos obtidos na Tabela 9.

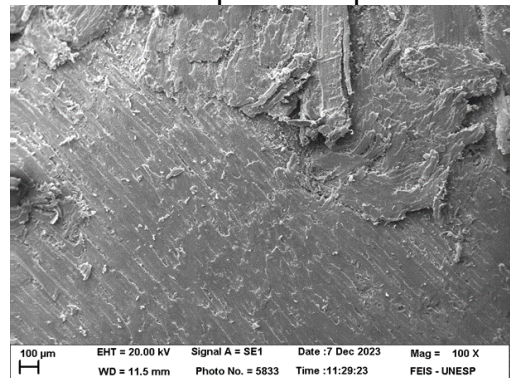
Podemos observar que na mistura 5EP (Figura 36(a)) existe um sistema atrativo para a percolação da água, enquanto que nas misturas 10EP e 15EP (Figura 36(b) e Figura 36(c) respectivamente) essa percolação é menor. Isso se deve ao baixo envelopamento em algumas regiões, consequência da menor porcentagem de adesivo. Apesar do epóxi ser considerado resistente à água (JIN *et al.*, 2015), as partículas de madeira são hidrofílicas (GILIO, 2020). Quando não há um bom envelopamento, as partículas de madeira absorvem mais água, resultando em valores elevados de absorção e inchamento. Esse fenômeno diminui a resistência dos painéis à umidade, inchamento e absorção, impactando negativamente suas propriedades físicas.

Através do ensaio de MEV, a Figura 37 ilustra como ficou a interação do epóxi com as partículas.

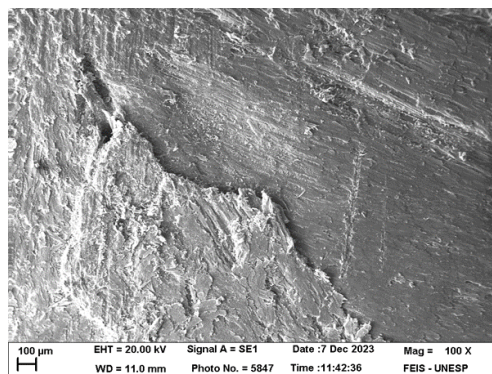
Figura 37 - Imagens de MEV da interface entre o epóxi e as partículas



(a) Superfície do cp da mistura 5EP



(b) Superfície do cp da mistura 10EP



(c) Superfície do cp da mistura 15EP

Fonte: Do autor

Analisando a imagem, podemos confirmar que houve um bom envelopamento das partículas de madeira conforme o acréscimo do adesivo, o que contribui para uma

colagem mais uniforme entre elas. Na Figura 37(a), observa-se que a quantidade de 5% de epóxi não conseguiu preencher todas as partículas, deixando alguns espaços vazios sem interação da resina com a madeira. Quanto menor essa interação e recobrimento, piores serão os resultados mecânicos das misturas devido ao enfraquecimento em determinadas regiões do painel. Em contrapartida, os painéis com 10% e 15% de epóxi apresentaram uma maior área de recobrimento, como mostrado nas Figura 37(b) e Figura 37(c).

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

A Tabela 13 apresenta os parâmetros de classificação dos painéis de acordo com aspectos físicos e mecânicos normativos nacionais.

Tabela 13 - Parâmetros físicos e mecânicos da ABNT NBR 14810-2 (2018)

ABNT NBR 14810-2 (2018)	Inchamento durante 24 h máximo (%)	Resistência à TP mínimo (MPa)	MOR mí- nimo (MPa)	MOE mí- nimo (MPa)	Painéis das misturas
P2	22	0,40	11	1800	
P3	17	0,45	15	2050	
P4	16	0,40	16	2300	100P 15EP
P5	11	0,45	18	2550	
P6	15	0,60	20	3150	
P7	10	0.75	22	3350	

Fonte: Elaborado pelo autor

A avaliação dos painéis das misturas propostas foi conduzida considerando que os resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas se encaixassem nos valores máximos e mínimos estabelecidos para cada classificação. As definições dessas classificações estão detalhadas no item 3.3.7.

Os painéis com 5% e 10% de epóxi não conseguiram ser classificados diante a norma, mesmo obtendo valores mecânicos expressivos. A justificativa da não classificação dessas misturas se dá principalmente pelo ensaio de Inchamento após 24h, onde, foi fator determinante para que houvesse classificação.

O painel com 15% de epóxi pode ser classificado como P4, P3 ou P2, devido aos seus bons resultados nos ensaios físicos e mecânicos. A sua classificação delimita que ele pode ser utilizado como painel não estrutural para condições secas e úmidas ou, painel estrutural para condições secas (ABNT, 2018)

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos com os ensaios para determinação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis, validou-se que a confecção dos painéis de aglomerados produzidos com o adesivo alternativo epóxi pode ser uma alternativa para a substituição da Ureia Formaldeído entre outros adesivos. Além de obter resultados melhores em alguns ensaios ao utilizar o adesivo epóxi, ele é menos nocivo ao meio ambiente e ao ser humano.

Através da análise estatística, conclui-se que os teores de epóxi afetam de forma significativa todas as propriedades físicas e mecânicas avaliadas.

De acordo com as análises realizadas em conformidade com a ABNT NBR 14810-2 (2018), os painéis produzidos a partir de 5 e 10% de epóxi não se enquadraram em nenhuma classificação, devido principalmente aos seus resultados relacionados aos ensaios de Inchamento em espessura e Absorção, não atingirem o mínimo especificado pela norma. Entretanto, a mistura com 15% de adesivo epóxi obteve bons resultados físicos e mecânicos, podendo então ser classificada como P4 – painel estrutural em condições secas, de acordo com a ABNT NBR 14810-2 (2018).

Pelo ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a análise das imagens comprova que 5% de epóxi não é uma porcentagem suficiente para que haja uma boa alocação nos espaços vazios do painel, tal como um envelopamento adequado das partículas, de modo a haver uma proteção em relação à água.

Outro aspecto importante que foi observado através da comparação com os resultados exploratórios foi de que o aumento da pressão de prensagem influenciou positivamente para o aumento da resistência física e mecânica dos painéis.

Através de meios comparativos com outros estudos que trabalharam com a mesma espécie de Pinus e com porcentagens de UF, foi possível concluir que o adesivo epóxi pode ser uma alternativa viável para a produção de painéis aglomerados. A porcentagem de 5% não conseguiu obter valores expressivos mediante a comparação com a literatura, enquanto a porcentagem de 10% foi superior em alguns ensaios físicos e mecânicos e a de 15% foi superior a todos os outros encontrados na literatura.

REFERÊNCIAS

ANG, A. F.; ASHAARI, Z.; LEE, S. H.; MD TAHIR, P.; HALIS, R. **Lignin-based copolymer adhesives for composite wood panels – A review**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2019.

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

ASTARI, L.; SUDARMANTO; AKBAR, F. Characteristics of Particleboards Made from Agricultural Wastes. [S. l.]. *Em: Iop Conference Series: Earth And Environmental Science*, 2019, **Anais**: Institute of Physics Publishing, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. ABIMCI. **Estudo setorial**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://abimci.com.br/abimci-lanca-estudo-setorial-2022/>. Acesso em: 23 mar. 2023.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14810-2**: Painéis de partículas de média densidade: parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm: determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR. 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 2022.

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

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

AUVERGNE, R.; CAILLOL, S.; DAVID, G.; BOUTEVIN, B.; PASCAULT, J. P. **Biobased thermosetting epoxy: Present and future**. [S. l.: s. n.]. 2014.

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

BAHARUDDIN, M. N. M.; ZAIN, N. M.; HARUN, W. S. W.; ROSLIN, E. N.; GHAZALI, F. A.; MD SOM, S. N. Development and performance of particleboard from various types of organic waste and adhesives: A review. [S. l.]. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 124, 2023.

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

BUDINSKI, K. & BUDINSKI, M. **Engineering Materials: Properties and Selection**. Pearson. [S. l.: s. n.], 2009

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. [S. l.: s. n.], John Wiley & Sons, Inc., 2002

CARNEIRO, R. P. **Colagem de junta de madeira com adesivo epóxi**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará - UFPA, Belém 2010.

CARVALHO, A. G.; CARLOS, R.; LELIS, C.; MIGUEL DO NASCIMENTO, A. Evaluation of adhesives based on tannins from pinus caribaea var. Bahamensis and acacia mearnsii in the manufacture of particleboard. [S. l.]. **Ciência Florestal**, n. 2, p. 479–489, 2014.

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

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

CETIN, N. S.; OZMEN, N. U. Use of organosolv lignin in phenol-formaldehyde resins for particleboard production I. Organosolv lignin modified resins. [S. l.]. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, v. 22, p. 477–480, 2002. Disponível em: Acesso em: 11 jul. 2023.

DE CÁSSIA, A.; CARNEIRO, O.; ROCHA VITAL, B.; GUSTAVO, P.; FREDERICO, U.; MÁRCIA, A.; LADEIRA CARVALHO, M.; VIDAURRE, G. B. Propriedades de chapas de aglomerado fabricadas com adesivo tânico de angico-vermelho (*anadenanthera peregrina*) e uréia-formaldeído. [S. l.]. **Revista Arvore**, v. 33, p. 521–531, 2009.

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

DEENY, S.; LANE, B.; HADDEN, R.; LAWRENCE, A. Fire safety design in modern timber buildings. [S. l.]. **Structural Engineer**, v. 96, n. 1, p. 48–53, 2018. Disponível em: Acesso em: 22 mar. 2023.

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

DIAS LEITE, E.; LIMA DE ALMEIDA COSTA, C.; DE, R.; OLIVEIRA, S.; CRISTINA, H.; CAVALCANTE, C. Impactos ambientais causados pelo desmatamento no Brasil. [S. l.]. **Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo**, v. 8, p. 19–28, 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA. **Transferência de tecnologia florestal - Pínus**. [S. l.: s. n.]. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/pinus/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 10 abr. 2023.

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

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

FOELKEL, C. **Gestão ecoeficiente dos resíduos florestais lenhosos da eucaliptocultura**. [S. l.]. Eucalyptus OnLine Book. 2007. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT07_residuoslenhosos.pdf. Acesso em: 14 maio 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. FAO. **Stats**. [S. l.: s. n.]. 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO/visualize>. Acesso em: 4 abr. 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. FAO. **The state of the world's forests 2022**. [S. l.: s. n.]. 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cb9360en/online/src/html/deforestation-land-degradation.html>. Acesso em: 30 mar. 2023.

FOREST RESOURCES ASSESSMENT. FRA. **Global Forest Resources Assessment**. [S. l.: s. n.]. 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/forest-resources-assessment/2020/en/>. Acesso em: 30 mar. 2023.

GARDNER, D. J. **Compression Molding Wood-Polymer Hybrid Composites**. [S. l.: s. n.]. 2002.

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

GONÇALVES, M. T. T. **Processamento da madeira**. Bauru. M.T.Ted. 2000.v. 1.

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. Produção e avaliação de painéis de partículas com resíduo de Pinus oocarpa aglutinadas com dois tipos de resinas. [S. l.]. **Caderno Pedagógico**, v. 20, n. 4, p. 889–902, 2023.

INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. IBÁ. **Relatório anual**. São Paulo: IBRE, 2021. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba2021-compactado.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2023.

INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. IBÁ. **Relatório anual**. São Paulo: IBRE, 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2023.

INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. IBÁb. **Dados estatísticos**. [S. l.: s. n.]. 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/dados-estatisticos>. Acesso em: 30 mar. 2023.

INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. IBÁc. **Sumário anual**. [S. l.: s. n.]. 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/sumarinho-2022.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2023.

INTERNATIONAL MARKET ANALYSIS RESEARCH AND CONSULTING GROUP. IMARC. **Particleboard market**. [S. l.: s. n.]. 2022. Disponível em: <https://www.imarcgroup.com/particle-board-market>. Acesso em: 4 abr. 2023.

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

IWAKIRI, S. *et al.* Produção de chapas de partículas de madeira de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus dunnii*. Curitiba. **Ciências Agrárias**. 15, p. 34–41, 1996.

IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; DA CUNHA, A. B.; DE CASTRO, V. G.; BRAZ, R. L.; VILLAS-BÔAS, B. T.; SANCHES, F. L.; BELLON, K. R. da R.; PINHEIRO, E. Avaliação da qualidade de painéis aglomerados produzidos com madeira de *Sequoia sempervirens* e *Pinus taeda*. [S. l.]. **Cerne**, v. 20, n. 2, p. 209–216, 2014.

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

JIN, F. L.; LI, X.; PARK, S. J. Synthesis and application of epoxy resins: A review. [S. l.]. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 29, p. 1–11, 2015.

JIN, F. L.; PARK, S. J. Thermal properties of epoxy resin/filler hybrid composites. [S. l.]. **Polymer Degradation and Stability**, v. 97, n. 11, p. 2148–2153, 2012.

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

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

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

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

MANSOURI, H. R.; NAVARRETE, P.; PIZZI, A.; TAPIN-LINGUA, S.; BENJELLOUN-MLAYAH, B.; PASCH, H.; RIGOLET, S. Synthetic-resin-free wood panel adhesives from mixed low molecular mass lignin and tannin. [S. l.]. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 69, n. 2, p. 221–229, 2011.

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

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

MAY, C. A. **Epoxy Resins: Chemistry and Technology**. [S. l.: s. n.]. Second Edition. 2018. 2018.

MENDES, R. F. **Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades de painéis OSB**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba 2010. Disponível em: Acesso em: 4 abr. 2023.

MENDES, L. M.; ALBUQUERQUE, C. E. C. de; IWAKIRI, S. **A indústria brasileira de painéis de madeira**. [S. l.: s. n.]. 2003. Disponível em: http://www.re-made.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=331. Acesso em: 4 abr. 2023.

MORDOR INTELLIGENCE. **Mercado De Resinas Epóxi**. [S. l.: s. n.]. 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/global-epoxy-resin-market-industry>. Acesso em: 20 maio 2024.

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

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

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

NUNES, S.; SANTOS, C.; MOUTINHO-PEREIRA, J.; CORREIA, C.; OLIVEIRA, H.; FERREIRA DE OLIVEIRA, J. M.; PEREIRA, V. T.; ALMEIDA, T.; MARUM, L.; DIAS, M. C. Physiological characterization and true-to-typeness evaluation of in vitro and ex vitro seedlings of *Pinus elliottii*: A contribution to breeding programs. [S. l.]. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 107, p. 222–227, 2016.

PABLO-ROMERO, M. P.; SÁNCHEZ-BRAZA, A.; GIL-PÉREZ, J. Is deforestation needed for growth? Testing the EKC hypothesis for Latin America. [S. l.]. **Forest Policy and Economics**, v. 148, 2023.

PAES, J. B.; TAVARES NUNES, S.; ANTÔNIO ROCCO LAHR, F.; DE FÁTIMA NASCIMENTO, M.; MARIA DE ALBUQUERQUE LACERDA, R. Qualidade de chapas de partículas de *Pinus elliottii* coladas com resina poliuretana sob diferentes combinações de pressão e temperatura. [S. l.]. **Ciência Florestal**, p. 551–558, 2011.

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

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

PESQUISA ANUAL DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. PAIC 2020. **Pesquisa anual da indústria da construção**. Rio de Janeiro, 30, p. 1–6, 2022. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/54/paic_2020_v30_informativo.pdf. Acesso em: 24 mar. 2023.

PIZZI, A.; MITTAL, H. L. **Handbook of Adhesive Technology Third Edition**. [S. l.: s. n.]. Third Editioned. 2017.

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

RAZERA, D. L. **Estudo sobre as interações entre as variáveis do processo de produção de painéis aglomerados e produtos moldados de madeira**. 2006. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba 2006.

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

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

SANCHES, F. L.; HILLIG, É.; IWAKIRI, S.; NAPOLI, L. M. Resistência de painéis aglomerados produzidos com mistura de madeira de espécies florestais tradicionais e não tradicionais strength of particleboard produced with mixed wood traditional and non-traditional forest species. [S. l.]. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 559–569, 2016.

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

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. SNIF. **Cadeira Produtiva**. [S. l.: s. n.]. 2020. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/cadeia-produtiva>. Acesso em: 30 mar. 2023.

SOLT, P.; KONNERTH, J.; GINDL-ALTMUTTER, W.; KANTNER, W.; MOSER, J.; MITTER, R.; VAN HERWIJNEN, H. W. G. Technological performance of formaldehyde-free adhesive alternatives for particleboard industry. [S. l.]. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 94, p. 99–131, 2019. Disponível em: Acesso em: 4 abr. 2023.

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

SOUZA, J. T. de. **Propriedades físico-mecânicas e resistência a biodeterioradores de chapas aglomeradas constituídas por diferentes proporções de madeira e casca de arroz**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 2009.

SOZIM, P. C. L.; NAPOLI, L. M.; FERRO, F. S.; MUSTEFAGA, E. C.; HILLIG, É. Propriedades de painéis aglomerados produzidos com madeiras de *Ligustrum lucidum* e *Pinus taeda*. [S. l.]. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 39, n. 1, 2019.

SPAROVEK, G.; BARRETTO, A.; KLUG, I.; PAPP, L.; LINO, J. A revisão do Código Florestal brasileiro. São Paulo, 89. **Novos Estudos**, p. 111–135, 2011.

TABUSE, H. E.; CORRÊA, C. B.; VAZ, L. G. Comportamento biomecânico do sistema prótese/implante em região anterior de maxila: análise pelo método de ciclagem mecânica. [S. l.]. **Revista de Odontologia da UNESP**, v. 43, n. 1, p. 46–51, 2014.

THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS REPORT. **United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division**. [S. l.: s. n.]. 2022. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/Goal-15/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

THOEMEN, Heiko. **Wood-based Panels - An Introduction for Specialists**. [S. l.]. Brunel University Press, 2010.

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

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

YANG, Y.; LI, C. Photosynthesis and growth adaptation of *Pterocarya stenoptera* and *Pinus elliottii* seedlings to submergence and drought. [S. l.]. **Photosynthetica**, v. 54, n. 1, p. 120–129, 2016.

YIN, H.; ZHENG, P.; ZHANG, E.; RAO, J.; LIN, Q.; FAN, M.; ZHU, Z.; CHEN, M.; CHENG, S.; ZENG, Q.; CHEN, N. An environmentally-friendly soybean based resin as an alternative to formaldehyde-based counterpart for biomass composites. [S. l.]. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 104, 2021.

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