



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

MICHELÂNGELO VARGAS FASSARELLA

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE LÃ DE VIDRO À RESINA UREIA-FORMALDEÍDO
NAS PROPRIEDADES DE PAINEL AGLOMERADO HOMOGÊNEO**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2025

MICHELÂNGELO VARGAS FASSARELLA

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE LÃ DE VIDRO À RESINA UREIA-FORMALDEÍDO
NAS PROPRIEDADES DE PAINEL AGLOMERADO HOMOGÊNEO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.
Orientador: Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves
Coorientadora: Dra. Izabella Luzia Silva Chaves

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2025

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

F249e Fassarella, Michelângelo Vargas, 1990-
Efeitos da adição de lã de vidro à resina ureia-formaldeído nas
propriedades de painel aglomerado homogêneo / Michelângelo
Vargas Fassarella. - 2025.
125 p. : il.

Orientador: Fabricio Gomes Gonçalves.

Coorientadora: Izabella Luzia Silva Chaves.

Tese (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e
Engenharias.

1. Madeira aglomerada. 2. Resíduos industriais. 3. Adesivos.
4. Processos de fabricação. 5. Resistência de materiais. 6.
Inovação e qualidade. I. Gonçalves, Fabricio Gomes. II. Chaves,
Izabella Luzia Silva. III. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.


CDU: 630

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE LÃ DE VIDRO À RESINA UREIA-FORMALDEÍDO
NAS PROPRIEDADES DE PAINEL AGLOMERADO HOMOGÊNEO**


Michelângelo Vargas Fassarella

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.


Aprovada em 15 de Abril de 2025

Documento assinado digitalmente
 **ROBERTO CARLOS COSTA LELIS**
Data: 15/04/2025 15:32:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Roberto Carlos Costa Lelis (Examinador externo)
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Documento assinado digitalmente
 **JUAREZ BENIGNO PAES**
Data: 15/04/2025 18:35:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Juarez Benigno Paes (Examinador interno)
Universidade Federal do Espírito Santo

Documento assinado digitalmente
 **FABRICIO GOMES GONCALVES**
Data: 15/04/2025 11:08:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

RESUMO

FASSARELLA, Michelângelo Vargas. **Efeitos da adição de lã de vidro à resina ureia-formaldeído nas propriedades de painel aglomerado homogêneo.** 2025. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves. Coorientadora: Dra. Izabella Luzia Silva Chaves.

O descarte inadequado de resíduos de lã de vidro é um desafio ambiental, cuja valorização na engenharia de materiais representa uma estratégia sustentável para mitigar impactos e aprimorar o desempenho de compósitos. Este estudo investigou a incorporação de resíduos de lã de vidro (LV) como material de enchimento na ureia-formaldeído (UF), seus efeitos nas propriedades do adesivo e sua influência nas propriedades físico-mecânicas, ignífugas e acústicas de painéis aglomerados. Foram produzidos painéis com densidade alvo de 700 kg/m³ com diferentes proporções de lã de vidro no adesivo (T1: 0%; T2: 3,34%; T3: 4,93%; T4: 6,52%; T5: 9,49%; T6: 12,35%). Fabricados em prensa hidráulica a 160 °C com uma força de compressão de 72 ton e um tempo de prensagem de 10 min, manteve-se uma proporção de 12% de adesivo em relação à massa seca das partículas de madeira. Análises como a caracterização do material de enchimento incluíram difração de Raio X, termogravimetria e espectroscopia no infravermelho, enquanto os painéis foram submetidos a análise do perfil densitométrico e microscopia eletrônica por varredura. A análise estatística envolveu regressão, análise de variância e teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Agrupamento hierárquico, análise de componentes principais e correlações de Pearson permitiu identificar fatores e verificar a intensidade das associações entre os parâmetros. Os resultados indicaram que a adição de 3,39% de LV ao adesivo melhorou a estabilidade dimensional, o módulo de ruptura, a ligação interna e o arrancamento de parafuso dos painéis. Enquanto teores mais elevados ampliaram o fator de amortecimento e a resistência ao fogo. Esses resultados ressaltam o potencial da lã de vidro como aditivo funcional no desenvolvimento de compósitos mais seguros e sustentáveis.

Palavras-chave: Resíduos; Enchimento; Painéis de partículas

ABSTRACT

FASSARELLA, Michelângelo Vargas. **Effects of adding glass wool to urea-formaldehyde resin on the properties of particleboard**. 2025. Dissertation (Master's in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, Brazil. Advisor: Ph.D. Fabricio Gomes Gonçalves. Co-advisor: Ph.D. Izabella Luzia Silva Chaves.

The improper disposal of glass wool waste poses an environmental challenge, where its utilization in materials engineering represents a sustainable strategy to mitigate impacts and enhance the performance of composites. This research examined the incorporation of glass wool (GW) waste as a filling material in urea-formaldehyde (UF), assessing its effects on the properties of the adhesive and its influence on the physical-mechanical, fireproof, and acoustic properties of engineered wood panels. Panels with a target density of 700 kg.m^{-3} were produced using different proportions of glass wool in the adhesive (T1: 0%; T2: 3.34%; T3: 4.93%; T4: 6.52%; T5: 9.49%; T6: 12.35%). Manufactured in a hydraulic press at $160 \text{ }^\circ\text{C}$ with a compression force of 72 tons and a pressing duration of 10 minutes, a ratio of 12% adhesive was maintained concerning the dry mass of the wood particles. Auxiliary analyses, such as the characterization of the filling material, included X-ray diffraction, thermogravimetry, and infrared spectroscopy, while the panels underwent densitometric profile analysis and scanning electron microscopy. The statistical analysis involved regression, variance analysis, and the Scott-Knott test ($p < 0.05$). Hierarchical clustering, principal component analysis, and Pearson correlations allowed for the identification of factors and verification of the strength of associations among the parameters. The results indicated that the addition of 3.39% of GW to the adhesive improved dimensional stability, the modulus of rupture, internal bonding, and screw withdrawal of the panels. In contrast, higher contents increased the damping factor and fire resistance. These findings highlight the potential of glass wool as a functional additive, promoting the development of safer and more sustainable composites.

Keywords: Waste; Filler; Particleboards

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 Objetivo geral	11
2.2 Objetivos específicos.....	11
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	12
3.1 O gênero Pinus.....	12
3.1.1 Histórico e produção das florestas de pinus.....	13
3.1.2 Principais Usos	14
3.2 Painéis aglomerados	15
3.2.1 Conceito	16
3.2.2 Produção	17
3.3 Adesivos e processo de adesão	18
3.3.1 Ureia-Formaldeído.....	19
3.3.2 Aditivos, extensores e enchimentos.....	21
3.4 Lã de vidro.....	24
3.4.1 Propriedades físicas, químicas e mecânicas da lã de vidro	24
3.4.2 Resíduos da lã de vidro e suas aplicações	25
3.4.3 Potencial de uso da lã de vidro em painéis aglomerados.....	26
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
4.1 Obtenção e preparo do material	27
4.1.1 Caracterização química e física da madeira de pinus	28
4.1.2 Caracterização física e química do resíduo de lã de vidro	29
4.2 Preparo e avaliação dos adesivos	31
4.3 Produção dos painéis aglomerados.....	32
4.4 Propriedades físicas dos painéis aglomerados.....	35
4.4.1 Densidade (ρ) e Razão de compactação (RC).....	35
4.4.2 Absorção de água e Inchamento em espessura	36
4.5 Propriedades mecânicas dos painéis aglomerados	36
4.5.1 Flexão Estática (FE_{MOE} e FE_{MOR}).....	37
4.5.2 Ligação interna	37
4.5.3 Dureza Janka.....	38
4.5.4 Resistência ao arrancamento de parafuso (face).....	38
4.6 Ensaio de Inflamabilidade dos painéis aglomerados	38
4.7 Propriedades acústicas dos painéis aglomerados	40

4.7.1 Isolamento de impacto sonoro (IIS).....	40
4.7.2 Decremento logarítmico de amortecimento acústico (<i>DI</i>) e eficiência de conversão acústica (<i>ECA</i>).....	41
4.8 Caracterização química dos painéis aglomerados.....	43
4.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	43
4.10 Análise estatística multivariada	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1 Características físicas e químicas das partículas de madeira.....	45
5.2 Características físicas e químicas do resíduo de lã de vidro.....	46
5.2.1 Difração de Raio X.....	46
5.2.2 Análise Térmica Diferencial (TGA).....	47
5.3 Propriedades tecnológicas dos adesivos.....	48
5.4 Propriedades físicas dos painéis aglomerados.....	51
5.4.1 Densidade e Razão de compactação (RC)	51
5.4.2 Absorção de água e Inchamento em espessura	55
5.5 Propriedades mecânicas dos painéis aglomerados.....	58
5.5.1 Módulo de elasticidade (FE_{MOE}) e de ruptura (FE_{MOR})	58
5.5.2 Ligação interna	60
5.5.3 Dureza Janka.....	62
5.5.4 Resistência ao arrancamento de parafuso.....	64
5.6 Inflamabilidade dos painéis aglomerados.....	66
5.7 Propriedades acústicas dos painéis aglomerados	68
5.7.1 Isolamento de impacto sonoro (IIS).....	68
5.7.2 Decremento logarítmico de amortecimento acústico (<i>DI</i>) e eficiência de conversão acústica (<i>ECA</i>).....	70
5.8. Caracterização química dos painéis aglomerados.....	71
5.9. Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	73
5.10 Análises estatísticas multivariadas	74
5.10.1 Análises de Cluster	75
5.10.2 Análise de componentes principais (ACP)	75
5.10.3 Correlação de Pearson	77
6. CONCLUSÕES.....	79
7. RECOMENDAÇÕES	80
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
APÊNDICE	116

1. INTRODUÇÃO

A utilização de resíduos no desenvolvimento de novos produtos desempenha um papel fundamental na sustentabilidade industrial. No setor de painéis reconstituídos, a incorporação de resíduos madeireiros tem sido amplamente explorada, especialmente em países desenvolvidos. Na Alemanha, por exemplo, a indústria de painéis aglomerados surgiu com o propósito de utilizar os resíduos florestais como matéria-prima principal, impulsionando avanços tecnológicos significativos na linha de produção a partir da década de 60 (Brito *et al.*, 2023; Iwakiri *et al.*, 2020a; Napoli *et al.*, 2013).

No Brasil, o setor de painéis de madeira surgiu com a empresa Placas do Paraná, utilizando resíduos locais. Os painéis aglomerados têm predominância no mercado de móveis (80%) e participação modesta na construção civil. O custo de produção está relacionado aos adesivos utilizados, como a ureia-formaldeído (UF), fenol-formaldeído (FF), melamina-formaldeído (MF) e resorcinol-formaldeído (RF) (Albuquerque *et al.*, 2020).

A ureia-formaldeído, desenvolvida na década de 30, classificada como de uso interno, possui ampla aplicação na indústria madeireira, representando um uso de 90% na produção de painéis aglomerados (Albuquerque *et al.*, 2020; Furtini *et al.*, 2023). Seu baixo custo a torna economicamente viável, porém apresenta desvantagens, como baixa resistência à umidade e degradação química das ligações poliméricas (Khorramabadi; Behrooz; Najafi, 2023). Para mitigar essas limitações, aditivos como parafinas são empregados para reduzir a absorção de água (Pizzi, 2003a).

Além disso, resinas UF de baixa razão molar proporcionam menor rigidez e resistência mecânica aos painéis (Albuquerque *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2023). A modificação da resina UF tem sido amplamente estudada visando à redução da emissão de formaldeído e a melhoria de suas propriedades físico-químicas (Ferro *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024). Portanto, há um crescente interesse na substituição parcial ou total dos adesivos sintéticos por fontes alternativas mais sustentáveis, explorando materiais com potencial para aplicações na indústria de painéis (Hussin *et al.*, 2022; Jerónimo; Fernandes; Briga-Sá, 2024; Santiago *et al.*, 2018).

A incorporação de aditivos e enchimentos na composição dos painéis pode aprimorar propriedades como resistência mecânica, estabilidade dimensional e desempenho frente a agentes externos. Entre os principais aditivos empregados estão catalisadores, retardantes de chama e agentes preservantes (Albuquerque *et al.*, 2020; Auriga *et al.*, 2022; Lopez *et al.*, 2022). O estudo dessas modificações é essencial para desenvolver produtos inovadores e sustentáveis, atendendo às exigências do mercado (Gonçalves; Lelis, 2009).

Nesse contexto, a lã de vidro surge como um resíduo com potencial industrial significativo, porém ainda pouco explorado na fabricação de painéis reconstituídos. Na construção civil, esse material é amplamente utilizado em isolamento termoacústico de construção a seco tipo *drywall*, forros e tubulações (Bem *et al.*, 2022).

Produzida em temperaturas superiores a 1300 °C, a lã de vidro é composta por filamentos de sílica e sódio aglomerados por resinas fenólicas, sendo comercializada em diferentes formatos, como mantas e placas (Borges *et al.*, 2017). Contudo, sua aplicação em compósitos à base de madeira ainda demanda estudos aprofundados para avaliar suas implicações nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho de painéis aglomerados mediante adição de resíduos de lã de vidro no adesivo ureia-formaldeído.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar as propriedades físicas e químicas da lã de vidro;
- Caracterizar as propriedades físicas e químicas da madeira de *Pinus* spp.;
- Caracterizar quimicamente o adesivo ureia-formaldeído antes e após o incremento da lã de vidro;
- Obter e avaliar os perfis de densidade aparente dos painéis, por densitometria de Raios-X;
- Avaliar as propriedades físicas, mecânicas e acústicas dos painéis aglomerados.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O gênero *Pinus*

Caracterizado como gimnosperma, o gênero *Pinus* pertence à família Pinaceae e engloba aproximadamente 120 espécies reconhecidas (Rodríguez; Ordás; Alvarez, 2022). As características químicas, decorrentes de seus componentes orgânicos, conferem singularidade a cada espécie (Prata, 2010; Trianoski, 2012). Com teores aproximados de 40-45% de celulose, 25-35% de hemicelulose, 20-30% de lignina e 5-15% de extrativos, o gênero apresenta diversas classes de terpenos e compostos fenólicos (Bhardwaj *et al.*, 2021; Fradinho *et al.*, 2002; Gupta *et al.*, 2024; Ioannou *et al.*, 2014; Nisula, 2018).

Possui uma constituição anatômica formada basicamente por traqueídeos e parênquimas (Breda, 2022; Prata, 2010; Santos, 2016). Os traqueídeos, fundamentais na sustentação da estrutura lenhosa, são células alongadas e fusiformes, com extremidades afinadas e dotadas de pontoações que permitem a condução de líquidos entre as células (Albuquerque; Latorraca, 2000). A transição entre madeira juvenil e adulta está diretamente relacionada ao comprimento desses traqueoides, e varia conforme a espécie e a densidade (Alteyrac; Cloutier; Zhang, 2006; Ballarin; Palma, 2003; Trevisan *et al.*, 2014).

Contudo, espécies de rápido crescimento produzem uma grande proporção de madeira juvenil, especialmente em climas tropicais, desafiando programas de controle de qualidade para a madeira e seus subprodutos (Acosta *et al.*, 2020; Rovedder *et al.*, 2021).

A densidade aparente do *Pinus* spp., em sua ampla variabilidade genética, varia consideravelmente. A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Norma Brasileira Regulamentadora - NBR 7190-2 (2022) (ABNT, 2022), estabelece critérios para projetos de estrutura de madeira e organiza uma classificação que considera a densidade da madeira (ρ) de *Pinus* em classes: 1 ($\geq 500 \text{ Kg/m}^3$), 2 ($400 \geq \rho < 500 \text{ Kg/m}^3$) e 3 ($350 \geq \rho < 400 \text{ Kg/m}^3$).

De acordo com a NBR 7190-2 (ABNT, 2022), para a madeira de *Pinus* spp. é prevista três classes mecânicas de acordo com o módulo de elasticidade (MOE): classe 1 ($\geq 11.000 \text{ MPa}$), classe 2 ($8.000 \geq \text{MOE} < 11.000 \text{ MPa}$) e classe 3 ($5.000 \geq$

MOE < 8.000 MPa). Os tipos de lenhos, juvenil e adulto, número de anéis de crescimento e suas proporções de lenho inicial e tardio interferem no módulo de elasticidade (Segundinho *et al.*, 2017).

3.1.1 Histórico e produção das florestas de pinus

As espécies do gênero *Pinus* surgiram há 250 milhões de anos no hemisfério Norte e possuem diversos centros de origem, o que lhe garantiu variabilidade genética e adaptação em diversas regiões do planeta (Cheddadi *et al.*, 2006; Premoli *et al.*, 2007; Richardson *et al.*, 2007). A cultura de *Pinus* spp. cobre aproximadamente 13,7 bilhões de hectares e contempla aproximadamente 20% das florestas plantadas no mundo (Santos, 2020).

Historicamente, sabe-se que a espécie chegou ao Brasil por meio de imigrantes europeus com intuito ornamental e produção madeireira (Aguiar; Sousa; Shimizu, 2014). Em 1880 são datados os primeiros plantios de *Pinus* spp. no Rio Grande do Sul (Resende, 2023). Em meados de 1922, por intermédio da Companhia de Melhoramento de São Paulo, surgem plantios de *Pinus* spp. com objetivos mercantis impulsionados por incentivos fiscais do governo no setor florestal, que se iniciou na década de 50 (Dores *et al.*, 2007).

Além disso, a crescente demanda de madeira, a partir da década de 60, intensificou os plantios comerciais na Região Sul e Sudeste (Kengen, 2019). A Lei 5.106 de 1966 que dispõe sobre os incentivos fiscais e a participação do Brasil no Acordo Internacional de Madeiras Tropicais em 1983 são considerados elementos fortalecedores da sustentabilidade e crescimento do setor florestal do País (Prata, 2010; Watson, 2016). Neste cenário, a silvicultura do *Pinus* foi um indutor da consolidação da indústria florestal brasileira, alimentando a cadeia produtiva de madeira, além de minimizar o impacto ambiental sobre as formações florestais nativas da região, em especial a araucária (Dores *et al.*, 2007; Rabelo *et al.*, 2020; Vasquez *et al.*, 2007).

As plantações de *Pinus* spp. seguem impulsionando o setor florestal brasileiro, agregando valor para produtores e diversos segmentos industriais (Ferla, 2023; IBÁ, 2024). O *Pinus* é o segundo gênero florestal mais cultivado no Brasil com plantações que somam 1,9 milhão de hectares e representam 19% da área de florestas

plantadas no País. A Região Sul, responsável por 89% da produção nacional é uma das principais áreas produtoras de *Pinus* do mundo, com produtividade estimada em 30,9 m³/ha⁻¹/ano⁻¹ e um ciclo de vida médio de 16,3 anos em 2022 (IBÁ, 2024).

A adaptação das espécies de *Pinus* no Brasil relaciona-se ao clima e ao solo locais. As espécies mais cultivadas, como *Pinus taeda*, *P. elliotti*, *P. caribaea*, *P. oocarpa*, *P. maximinoi* e *P. tecunumanii*, estão bem adaptadas na região Sul (Oliveira, 2020). Outras espécies vem conquistando espaço como *P. patula*, *P. greggi*, *P. chiapensis*, *P. merkusii* e *P. kesiya* que foram introduzidas com fins experimentais em programas de melhoramento genético por empresas e instituições de pesquisa (Resende, 2023). O setor florestal brasileiro, líder mundial em produtividade de madeira, atende à demanda global por celulose, madeira serrada e outros produtos, como painéis de madeira reconstituída (IBÁ, 2024).

3.1.2 Principais Usos

O gênero *Pinus* é amplamente utilizado em diversas indústrias, desde serraria e celulose até a produção de chapas, laminação, escoras, mourões, postes, paletes, embalagens, palitos, construção naval e geração de energia (Candaten *et al.*, 2021; Ferla, 2023; Gonçalves *et al.*, 2021).

Algumas espécies fornecem resina, um produto de alto valor agregado no mercado (Candaten *et al.*, 2021; Moreira; Quadros; Alves, 2016). Desta matéria-prima, obtêm-se o breu e a terebintina, utilizados em diversas aplicações, como tintas, vernizes, adesivos, colas, perfumes, bioerbicidas, produtos de higiene, gomas de mascar e medicamentos (Fraga-Corral *et al.*, 2020; López-Álvarez; Zas; Marey-Perez, 2023; Rodríguez-García *et al.*, 2014).

A produção de celulose advinda da cultura de *Pinus* spp. representa cerca de 10% da produção nacional, atingindo 2,5 milhões de toneladas em 2024 (IBÁ, 2024). Na fabricação do papel, as fibras longas são amplamente utilizadas no segmento de embalagens, com aproximadamente 13% dessa produção destinada ao mercado externo (Resende, 2023).

Segundo o relatório da Associação Brasileira de Embalagens (ABRE), produzida pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) em 2023, o valor bruto da produção desses produtos atingiu o montante de R\$ 144,4 bilhões, com produtos advindos da madeira

somando mais de 40% desse valor. A madeira de *Pinus* spp. também é uma fonte interessante para a extração de nanofibras de celulose, com um índice de cristalinidade aproximado de 75% (Moriani; Vilaplana; Ek, 2016).

Na produção de painéis aglomerados de madeira, o *P. caribaea*, *P. chiapensis*, *P. maximinoi*, *P. oocarpa*, *P. tecunumanii* e o *P. taeda* são as espécies mais indicadas (Resende, 2023). A escolha da espécie, entretanto, é uma das variáveis mais importantes no processo de produção dos painéis de madeira aglomerada, haja visto que interfere na qualidade do produto final (Iwakiri *et al.*, 2012a; Rios; Pereira; Vieira, 2016). Em geral, espécies de madeira de baixa densidade possibilitam melhor razão de compactação dos aglomerados (definida como a relação entre as densidades do painel e da madeira), o que conferem melhores características mecânicas aos painéis produzidos (Iwakiri *et al.*, 2002).

3.2 Painéis aglomerados

No Brasil, o início da produção de painéis aglomerados (*particleboard*) começou na década de 60 com a empresa Placas do Paraná, com a utilização de resíduos madeireiros locais (Melo; Menezzi, 2010). Na década de 90 a taxa de crescimento na produção se destacava no setor florestal, consolidando a indústria de aglomerados na economia brasileira (Noce *et al.*, 2007), comercialmente designado como MDP (*medium density particleboard*). O Brasil é um dos países com tecnologia mais avançada na fabricação de painéis de madeira reconstituída no mundo (França *et al.*, 2019).

No Brasil, cerca de 4% de toda a área plantada, no ano de 2023, foi destinada ao segmento de pisos e painéis. Em 2023, as vendas domésticas de painéis cresceram 1,5%, totalizando 7,1 milhões de m³, enquanto as exportações caíram, exceto para a América do Sul (IBÁ, 2024).

De acordo com os dados da *Food and Agriculture Organization* - FAO (2023), em 2022 foram produzidos 3.560.000 m³ de painéis aglomerados no Brasil. No entanto, as vendas de painéis aglomerados caíram 2,7% entre 2023 e 2024 (IBÁ, 2024). Vale ressaltar a elevada carga tributária incidente sobre o setor, o que compromete a competitividade das indústrias nacionais, restringindo oportunidades de exportação e limitando a expansão do mercado interno (Bargas, 2012; Santos *et al.*, 2022).

3.2.1 Conceito

De acordo com (Iwakiri *et al.*, 2020a), os painéis de madeira são definidos como produtos compostos de elementos da madeira, como lâminas, sarrafos, partículas e fibras, obtidas em diferentes formas de processamento e reconstituídas a partir de ligação adesiva. Dentre os principais tipos de painéis de madeira podem-se citar os painéis de madeira aglomerada, produzidos com partículas de madeira encoladas com distribuição aleatória, normalmente com resina sintética e consolidado por calor e pressão (Baharoğlu *et al.*, 2013; Freire; Rosa, 2015; Iwakiri *et al.*, 2012b; Weber, 2011). De acordo com a NBR 14810-1, (ABNT, 2018), os painéis MDP de média densidade possuem densidade entre 551 e 750 kg/m³.

Os painéis de madeira aglomeradas são materiais amplamente utilizados na mobília e design de interiores, revestimentos de pisos e paredes, se destacando como uma opção econômica para diversas aplicações industriais (Baharoğlu *et al.*, 2013; Chahud *et al.*, 2012; Freire; Rosa, 2015; Napoli *et al.*, 2013; Regmi *et al.*, 2022; Ribaski *et al.*, 2023). Com predominância no mercado de móveis (80%), seu principal custo está relacionado aos adesivos, como a ureia-formaldeído (UF), fenol-formaldeído (FF), melamina-formaldeído (MF) e resorcinol-formaldeído (RF) (Albuquerque *et al.*, 2020).

O princípio de fabricação do MDP oferece diversas vantagens em comparação com a madeira maciça como menor custo de produção, melhor trabalhabilidade, leveza, eliminação dos efeitos da anisotropia e dos defeitos naturais da madeira, além da possibilidade de controlar parâmetros de fabricação e garantir propriedades específicas ao produto final (Bianche, 2009; Fehrmann; Belleville; Ozarska, 2022; Martins *et al.*, 2021).

Outro benefício é a menor exigência em relação à matéria-prima, o que possibilita o uso de diferentes resíduos lignocelulósicos e industriais, contribuindo com a sustentabilidade e com a redução do desperdício de recursos (Kariuki *et al.*, 2020; Pędzik; Janiszewska; Rogoziński, 2021). No entanto, possuem algumas limitações, como menor resistência à umidade, cargas mecânicas e emissões de compostos orgânicos (Amini *et al.*, 2020; Benhamou *et al.*, 2022; Cademartori *et al.*, 2019; Rovira *et al.*, 2016; Silva, 2008).

3.2.2 Produção

De acordo com Iwakiri *et al.* (2020a), o processo de produção dos painéis aglomerados inclui a geração de partículas, secagem e classificação, aplicação de adesivos, formação do colchão, pré-prensagem, prensagem a quente, resfriamento, acabamento, classificação final, embalagem e armazenamento.

Na etapa de geração das partículas, a umidade da madeira e a presença de casca são fatores de grande importância (Araujo *et al.*, 2019; Soratto *et al.*, 2013). Teores de umidade das toras abaixo de 35%, por exemplo, dificultam o controle da geometria das partículas, por outro lado, madeira saturada pode ser esmagada e obstruir espaços entre facas e contra-facas (Iwakiri, 1989; Müzel, 2013).

No processo de geração de partículas são definidos os elementos dimensionais e a relação entre o comprimento e a espessura, conhecida como razão de esbeltez (Dias, 2005; Haselein *et al.*, 2002; Peixoto; Brito, 2000). Por sua vez, a geometria das partículas apresentam interações diretas com a área superficial das partículas e a disponibilidade de resina por unidade de área das partículas (Iwakiri *et al.*, 2020a; Kollmann; Côté, 1968). As variações da geometria das partículas possibilitam a produção de diferentes tipos de painéis a serem fabricados de acordo com as propriedades requeridas (Bazzetto; Bortoletto; Brito, 2019; Benthien; Lüdtke; Ohlmeyer, 2019; Brito *et al.*, 2023; Wronka; Kowaluk, 2022).

No processo industrial, o controle do teor de umidade das partículas é um fator importante, sendo comum o uso de secadores do tipo tambor rotativo que reduzem a umidade para níveis inferiores a 3% (Iwakiri *et al.*, 2000; Müzel, 2013).

Para a aplicação do adesivo, sistemas de aspersão garantem a quantidade e a distribuição homogênea do adesivo na superfície das partículas, assegurando propriedades uniformes em toda a extensão do painel (Albuquerque *et al.*, 2020; Bianche, 2009).

A estação formadora, que cria o colchão, opera com formação contínua ou descontínua conforme o tipo de painel, seja homogêneo, multicamadas ou com camadas graduais (Iwakiri *et al.*, 2020a). Na prensagem, a pressão varia de 12 a 40 kgf/cm², dependendo da densificação do material, enquanto a temperatura, ajustada

para a cura da resina, atinge cerca de 200 °C para ureia-formaldeído (Almeida, 2009; Brito *et al.*, 2023; Nunes, 2008).

Para assegurar a qualidade dos painéis, são utilizadas normas tanto nacionais quanto internacionais. No Brasil, a norma vigente é a NBR 14810-2, publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2018), que define os parâmetros e os métodos de ensaio para a avaliação de painéis de partículas de média densidade.

3.3 Adesivos e processo de adesão

O processo de adesão entre o adesivo e as partículas de madeira é alcançado pelo fluxo, transferência, penetração, umedecimento, cura adequada do adesivo e sua solidificação (Albuquerque *et al.*, 2020; Frihart; Hunt, 2010). Tais mecanismos podem ser explicados pelas teorias mecânicas, difusão de polímeros e adesão química (Collett, 1972; Vick, 1999).

As ligações químicas podem ser primárias, como covalentes e iônicas, ou envolver forças intermoleculares (Pizzi, 1994; Pizzi; Mittal, 2010). Essas interações são influenciadas por diversos fatores, incluindo as características anatômicas, químicas e físicas da madeira, as propriedades do adesivo e os métodos de produção adotados (Bolgenhagen; Melo; Sellin, 2021; Frihart, 2005; Furtini *et al.*, 2023).

A adesão de dois componentes é condicionada por um contato interfacial próximo, permitindo a transferência de força ou trabalho através dessa interface (Celestino, 2020; Frihart; Hunt, 2010). A adesão é considerada um fenômeno que envolve tanto a resistência mecânica do adesivo quanto as forças que atuam entre os átomos nas interfaces coladas (Wake, 1977). As forças interfaciais, que influenciam a resistência mecânica do sistema dependem das propriedades dos materiais envolvidos (Effah, 2017).

O adesivo é o componente de maior custo na linha de produção dos painéis aglomerados e são classificados de acordo com suas características químicas como reatividade, estrutura molecular, grau de reticulação e comportamento frente a variações de pH e temperatura (Albuquerque *et al.*, 2020; Araujo, 2024; Gonçalves, 2012; Souza *et al.*, 2023; Vick, 1999).

Os adesivos convencionais incluem resinas sintéticas termoendurecedoras: fenol-formaldeído (PF), ureia-formaldeído (UF), melamina-formaldeído (MF), resorcinol-formaldeído (RF), tanino-formaldeído (TF), isocianato e licor sulfico (Albuquerque *et al.*, 2020; Ferdosian *et al.*, 2017). Além disso, existem adesivos naturais, derivados do amido, de proteína animal e vegetal, e os adesivos termoplásticos que abrange poliacetato de vinilia, emulsão polimérica de isocianato e aqueles aplicados em estado fundido, como *hot melt* (Albuquerque *et al.*, 2020; Pizzi, 2003b).

Os adesivos termoendurecedores, ao serem submetidos a altas temperaturas, passam por alterações químicas irreversíveis que os tornam rígidos e insolúveis, devido a reações de policondensação (Maloney, 1993). Tais adesivos proporcionam desempenho superior em termos de resistência à adesão, calor e umidade, além da compatibilidade com outros polímeros quando comparados aos adesivos naturais. Porém, a sua produção está associada às emissões de formaldeído (Azerêdo *et al.*, 2022; Conner; Bhuiyan, 2017; Ferdosian *et al.*, 2017; Mo; Sun, 2013).

A pressão para reduzir ou substituir os adesivos à base de formaldeído é impulsionada pelos efeitos adversos desse composto sobre a saúde humana e o meio ambiente, levando ao fortalecimento das regulamentações ambientais e de saúde que visam restringir progressivamente seu uso em diversos produtos (Arias *et al.*, 2021; Hidayat *et al.*, 2022; Hosseini *et al.*, 2020).

3.3.1 Ureia-Formaldeído

A ureia-formaldeído (UF) é um polímero sintético termoendurecível e opaco, obtido a partir da síntese dos monômeros de ureia, gerada pela reação de dióxido de carbono e amônia sob calor e pressão, e de formaldeído, derivado da oxidação do metanol (Furtini *et al.*, 2023; Guterres, 2015; Moutousidis *et al.*, 2023; Nuryawan; Singh; Park, 2015; Pizzi, 2003c). Conforme Albuquerque *et al.* (2020), a UF é o adesivo mais empregado na fabricação de painéis aglomerados para uso interno. Na indústria, utiliza-se cerca de 12% de resina de UF em relação à massa total das partículas, com o processo de prensagem ocorrendo a temperaturas entre 130 e 160 °C (Gonçalves, 2012; Sugahara, 2018).

A razão molar entre os monômeros de formaldeído e ureia (F/U) varia de 1,2:1 a 2,2:1, sendo mais comum valores entre 1,4:1 e 1,6:1 (Ghani *et al.*, 2018; Guterres,

2015; Pizzi, 2003a). Adesivos com uma razão molar inferior a 1,6:1 são classificados como de baixa razão molar, tendo um tempo de vida útil mais prolongado e menor quantidade de formaldeído livre. Contudo, apresentam características como viscosidade mais elevada, menor resistência à umidade, menor rigidez e resistência mecânica, além de um ritmo de cura mais lento (Nuryawan *et al.*, 2017; Nuryawan *et al.*, 2015; Silva, 2008).

Dentre os fatores que influenciam a colagem da madeira, a viscosidade, o tempo de gel, o teor de sólidos e o pH dos adesivos são propriedades fundamentais que afetam diretamente a colagem e a qualidade de painéis aglomerados (Almeida, 2009; Brito *et al.*, 2023; Hemmilä *et al.*, 2017).

A viscosidade dos adesivos, influenciada pelo teor de sólidos e grau de condensação da resina, é crucial para o desempenho dos compósitos, pois afeta o tempo de cura e a adesão (Pizzi, 2003c). Valores muito baixos comprometem a ligação, enquanto viscosidades elevadas prejudicam a fluidez e a uniformidade da aplicação (Liu *et al.*, 2022), além de demandar maiores pressões nos sistemas de aspersão utilizados na linha de produção industrial.

Fatores como a redução na razão molar F/U estão diretamente relacionados ao aumento nos teores de sólidos, devido a alterações na estrutura química e ao maior grau de reticulação das resinas (Nuryawan *et al.*, 2017, 2020). Embora razões molares mais elevadas melhorem a qualidade inicial da ligação, elas também resultam em emissões significativamente maiores de formaldeído, ressaltando a importância de equilibrar essas variáveis (Pizzi, 2003a).

De acordo com Pizzi (2003a) o controle do tamanho molecular médio da resina é fundamental para garantir o fluxo adequado nas aplicações em compensados e aglomerados durante a prensagem a quente. Resinas de baixo peso molecular podem apresentar fluxo excessivo, causando falhas e desperdícios. Para mitigar esses efeitos, ajustes no pH, como a adição de ácidos ou agentes de cura, melhoram a adesão e garantem propriedades mecânicas adequadas (Guimarães *et al.*, 2013; Pizzi, 2003c).

Um controle adequado do pH otimiza as propriedades interfaciais e promove uma ligação mais eficiente entre as partículas aglomeradas (Dunky, 2003; Ghani *et al.*, 2018). Por outro lado, pH inadequado podem interferir na velocidade de cura e a

capacidade adesiva da resina, comprometendo seu desempenho (Ghani *et al.*, 2018; Kawalerczyk *et al.*, 2023; Rudawska, 2019; Weber, 2011).

O adesivo UF na indústria dos aglomerados destaca-se por sua reatividade, baixo custo, facilidade de manuseio e aplicação, cura rápida, solubilidade em água, dureza, baixa inflamabilidade, além de apresentar coloração clara (Cao *et al.*, 2015; Owodunni *et al.*, 2020; Silva, 2008; Wang *et al.*, 2023). No entanto, devido à alta higroscopicidade, possui baixa durabilidade em ambientes úmidos, condição que pode ser agravada em temperaturas mais elevadas (Khorramabadi *et al.*, 2023; Moslemi *et al.*, 2020; Pizzi, 2003a).

3.3.2 Aditivos, extensores e enchimentos

Os adesivos sintéticos utilizados na produção de painéis de madeira frequentemente incorporam aditivos, extensores, e enchimentos para melhorar suas propriedades, aumentar o volume e reduzir custos das resinas (Albuquerque *et al.*, 2020; Conner; Bhuiyan, 2017; Vick, 1999). Aditivos, como catalizadores, emulsão de parafina, retardantes de fogo e imunizantes contra agentes degradadores são substâncias químicas incorporadas com a finalidade de melhorar características específicas do painel (Albuquerque *et al.*, 2020; Mamiński; Borysiuk; Parzuchowski, 2008).

Exemplos de aditivos sintéticos incluem soluções de ureia e pré-polímeros de ureia-formaldeído (Park *et al.*, 2008), metabissulfito de sódio (Vasudevan, 2015), melamina (Paiva *et al.*, 2012), propilamina, metilamina, etilamina e soluções de ciclopentanamina (Boran *et al.*, 2012). Por outro lado, taninos, ligninas e celuloses microfibriladas podem aprimorar adesivos UF, aumentando a resistência à umidade e reduzindo a emissão de formaldeído (Gonçalves; Lelis, 2009; Janiszewska-Latterini *et al.*, 2023; Karagiannidis; Markessini; Athanassiadou, 2020; Kariuki *et al.*, 2019; Pereira, 2015; Wang *et al.*, 2023; Younesi-Kordkheili, 2024).

Os extensores, como amido ou proteína, proporcionam características adesivas e melhor controle da viscosidade (Albuquerque *et al.*, 2020). Por fim, os materiais de enchimentos aumentam o volume do adesivo, melhoram propriedades físico-químicas, reduzem emissões de formaldeído, melhoram resistência mecânica e térmica dos painéis, além de reduzir custos (Bayatkashkoli *et al.*, 2017; Çavdar,

2020; Dudkin; Krivoshapkin; Krivoshapkina, 2006; Onat; Kelleci, 2022; Qiaoja *et al.*, 2006).

Os efeitos da introdução de nano-sílicas na formulação de resina ureia formaldeído, são destacados por Dukarska e Bartkowiak (2016), que evidenciam melhorias na durabilidade, reatividade, desempenho mecânico e térmico dos painéis, além da redução nas emissões de formaldeído. Adicionalmente, pesquisas sobre enchimentos inorgânicos, como óxidos metálicos, sílica e argilas, têm demonstrado potencial na otimização de formulações de resinas UF (Cademartori *et al.*, 2019; Dashti *et al.*, 2012; Filho *et al.*, 2023; Gul *et al.*, 2020; Roumeli *et al.*, 2012; Salari *et al.*, 2013).

Contudo, a pesquisa sobre modificadores na resina UF enfrenta desafios para melhorar as formulações, mantendo propriedades desejadas e reduzindo emissões de formaldeído (Ghani *et al.*, 2018; Gonçalves; Lelis, 2009; Pereira, 2015; Rovira *et al.*, 2016; Silva, 2008).

A Tabela 1 sintetiza pesquisas com adesivos naturais e sintéticos na produção de painéis reconstituídos de madeira, destacando funções de aditivos, extensores e enchimentos.

Tabela 1. Revisão bibliográfica sobre formulações de adesivo por meio de aditivos, extensores e materiais de enchimento em adesivos para painéis reconstituídos de madeira

Categoria	Tipo de Composto	Função Principal	Referências
Aditivos	Catalisadores (Cloreto de amônio, Sulfato de amônio)	Redução do pH da resina, acelera a cura do adesivo	(Albuquerque <i>et al.</i> , 2020; Lima <i>et al.</i> , 2023; Španić <i>et al.</i> , 2020; Younesi-Kordkheili; Pizzi, 2016)
	Endurecedores e reticuladores (Sulfato de amônio, Alumínio, polietilenoimina ramificado)	Melhora as propriedades do adesivo, reduz emissão de formaldeído e fortalece ligações internas	(Atar <i>et al.</i> , 2014; Ghani <i>et al.</i> , 2019; Kawalerczyk <i>et al.</i> , 2023; Španić <i>et al.</i> , 2020)
	Emulsão de parafina, glutaraldeídos	Redução da higroscopicidade e melhora da estabilidade dimensional	(Benthien <i>et al.</i> , 2019; Luckman <i>et al.</i> , 2021; Mamiński <i>et al.</i> , 2008; Trianoski; Iwakiri; Matos, 2014; Wang <i>et al.</i> , 2023)
	Retardantes de fogo (Fosfato de amônio, Ácido bórico, Sulfato de amônio, além de compostos lignossulfonados, fosfatados, orgânicos e minerais e seus derivados)	Melhora estabilidade térmica, inflamabilidade e resistência ao fogo	(Albert; Liew, 2024; Angelini <i>et al.</i> , 2019; Brahmia <i>et al.</i> , 2020; Gillela <i>et al.</i> , 2024; Gumus; Doganci; Aytac, 2024; Madyaratri <i>et al.</i> , 2023; Özdemir; Odabas; Tutus, 2017; Svensson <i>et al.</i> , 2023; Yadav, 2024)
Extensores	Proteínas e amidos	Redução de custos, melhora na viscosidade do adesivo	(Liaw <i>et al.</i> , 2019; Nagamadhu <i>et al.</i> , 2019; Zhang <i>et al.</i> , 2023)
	Resíduos orgânicos (madeiras, fibras naturais, caulim, farinha de casca de nozes)	Aumenta viscosidade e melhora adesão	(Albuquerque <i>et al.</i> , 2020; Çavdar, 2020; Dudkin <i>et al.</i> , 2006; Ferreira <i>et al.</i> , 2019)
Enchimentos	Nanopartículas (nanoargilas, óxidos metálicos, sílica, alumina, Zeólitas, carbonato de cálcio, trióxido de antimônio, silano)	Melhoria da resistência térmica, mecânica, biológica e redução de emissão de formaldeído	(Albert; Liew, 2024; Bansal; Barshilia; Pandey, 2024; Torun, 2022; Çavdar, 2020; Dashti <i>et al.</i> , 2012; Dorieh <i>et al.</i> , 2022; Dukarska; Bartkowiak, 2016; Lima <i>et al.</i> , 2023; Liu; Zhu, 2014; Onat; Kelleci, 2022; Qiaoja <i>et al.</i> , 2006; Roumeli <i>et al.</i> , 2012; Rovedder <i>et al.</i> , 2021; Salari <i>et al.</i> , 2013; Srivabut; Ratanawilai; Hiziroglu, 2018; Tian <i>et al.</i> , 2024)
	Celulose microfibrilada (CMF)	Melhora reologia das resinas e aumenta resistência mecânica	(Hosseini <i>et al.</i> , 2020; Karagiannidis <i>et al.</i> , 2020; Khanjanzadeh <i>et al.</i> , 2019; Lengowski; Bonfatti, 2019; Mahrdt <i>et al.</i> , 2016; Moslemi <i>et al.</i> , 2020; Veigel <i>et al.</i> , 2011)

3.4 Lã de vidro

Produzida em fornos elétricos em temperaturas a 1300 °C, sua fabricação envolve a fusão de sílica e sódio, seguida por um intenso jato de ar que transforma o vidro derretido, formando uma manta de filamentos aglomerados que são pulverizadas com resinas fenólicas termostáveis (Borges, 2007; Borges *et al.*, 2017; Chapelle, 2016; Kapoor; Mudgal; Muruganandam, 2021; Yang *et al.*, 2015).

A lã de vidro é um material isolante amplamente utilizado na construção civil, caracterizado por suas finas fibras de vidro, com diâmetro variando entre 3 e 15 µm, e comprimento variável (Achchaq; Djellab; Beji, 2009; Evangelista, 2011; Fernandes *et al.*, 2018; Lund; Yue, 2008; Meftah *et al.*, 2019). Comercializada na forma de rolos, mantas ou placas, muitas vezes aluminizadas ou revestidas com feltro para tubulações e equipamentos, a lã de vidro é incombustível e pode resistir a altas temperaturas, sendo seguro para uso contínuo em aplicações industriais (Borges *et al.*, 2017; Kapoor *et al.*, 2021; Prasad *et al.*, 2023).

A resistência térmica da lã de vidro deve-se à sua composição inorgânica, rica em sílica e óxidos minerais, que conferem estabilidade térmica e incombustibilidade. O material mantém suas propriedades isolantes e estruturais em temperaturas próximas a 300 °C (Jamnani; Shavandi; Hassan, 2016).

Na construção civil, a lã de vidro é utilizada em painéis de *drywall* e revestimentos de forros, sofisticando projetos comerciais e residenciais (Bem *et al.*, 2022; Evangelista; Tenório; Oliveira, 2012). É uma alternativa de isolante acústico e térmico, favorecendo a absorção de ondas sonoras e inibindo a transmissão de calor em diversos segmentos da indústria automotiva, construção civil e eletrodomésticos (Kapoor *et al.*, 2021; Meftah *et al.*, 2019).

3.4.1 Propriedades físicas, químicas e mecânicas da lã de vidro

A lã de vidro é um material mineral amorfo composto majoritariamente por sílica (SiO₂), cuja concentração varia entre 62% e 68%, desempenhando papel vitrificante (Lemougna *et al.*, 2020). Apesar de compartilhar características com a lã de rocha, a lã de vidro possui um maior teor de SiO₂ e Na₂O (Yliniemi *et al.*, 2020). Sua

formulação inclui álcalis, como óxidos de sódio e potássio ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, 15% a 18%), além de óxidos estabilizadores, como carbonato de cálcio e magnésio ($\text{CaO} + \text{MgO}$, 9% a 12%), que conferem maior estabilidade estrutural (Lemougna *et al.*, 2020; Lima; Zenerato, 2016). Outros constituintes, como dolomita, calcário, ulexita, anidrita, óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3) e sulfato de sódio, também estão presentes, resultando em um material levemente básico com propriedades físico-químicas específicas (Adediran *et al.*, 2021).

A densidade da lã de vidro varia de 15 a 40 kg/m^3 , com uma resistência térmica de $2,85 \text{ K}^2\text{W}^{-1}$ e um coeficiente de energia incorporada de 28 MJ/kg^{-1} . Esses materiais apresentam uma estrutura que retém pequenas bolsas de ar, o que contribui para suas propriedades isolantes térmicas e acústicas (Kapoor *et al.*, 2021).

Os feltros de lã de vidro não apresentam orientação estrutural definida, conforme indicado por medições de contração linear, tração e torção (Otto, 1961). Chappelle (2016) evidenciou que as fibras são conectadas por ligantes com rigidez axial e torcional definida. Em decorrência da densidade e da característica estrutural do material, as mantas de lã de vidro apresentam baixa resistência a tração, com valores entre 3,2 e 4,8 MPa, dependendo do método de produção e da uniformidade estrutural (Yang *et al.*, 2015).

Para correlacionar a resistência mecânica das fibras de lã de vidro aos padrões de fratura, Lund e Yue (2008) utilizaram a distribuição de Weibull e realizaram ensaios de tração uniaxial em fibras individuais de três tipos de lã de vidro. Os autores verificaram que a resistência à tração variou entre 1370 e 1840 MPa, em função da composição química e do tratamento térmico aplicado.

3.4.2 Resíduos da lã de vidro e suas aplicações

Os resíduos de lã de vidro, classificados como não perigosos e não inertes (Classe II-A) conforme NBR 10.004 (ABNT, 2024), são gerados principalmente em atividades de construção e demolição, sendo frequentemente descartados em aterros sanitários (Borges *et al.*, 2017; Evangelista *et al.*, 2012). Na Europa, sua produção anual é estimada em 800.000 toneladas, o que implica elevado volume nos aterros, dada sua baixa densidade. (Adediran *et al.*, 2021; Lemougna *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021; Yliniemi *et al.*, 2020).

A incorporação da lã de vidro em geopolímeros e compósitos tem ganhado destaque como uma alternativa para mitigar os desafios ambientais associados ao seu descarte (Evangelista, 2011). Diversos estudos demonstram seu potencial para aplicações em compósitos avançados, aprimorando propriedades mecânicas, térmicas, acústicas e a durabilidade (Altememy *et al.*, 2024; Chen; Yan, 2018; Marhoon; Rasheed, 2015; Järvelä; Pohjonen; Törmälä, 1985; Li *et al.*, 2021; Seraji *et al.*, 2018; Sharma *et al.*, 2013; Su; Zheng; Deng, 2019; Tsukamoto *et al.*, 2014).

A ampliação de estratégias para integrar resíduos de lã de vidro em processos produtivos é uma abordagem técnica e sustentável. Desenvolver métodos de incorporação pode reduzir impactos ambientais e impulsionar avanços tecnológicos em setores que necessitam de materiais de alto desempenho.

3.4.3 Potencial de uso da lã de vidro em painéis aglomerados

A incorporação de lã de vidro em elementos reconstituídos de madeira ainda é pouco explorada, especialmente em painéis de partículas. No entanto, estudos indicam que esse material pode atuar como um aditivo funcional.

Embora a adição Lã de vidro incorporada nas partículas de madeira tenha reduzido algumas propriedades mecânicas dos painéis, observa-se vantagens desse material em termos de isolamento térmico e redução de peso (Ülker; Burdurlu, 2016). Esse estudo indica que a lã de vidro apresenta potencial para ser uma alternativa viável na produção de painéis de madeira reconstituída, embora mais pesquisas sejam necessárias para aperfeiçoar sua aplicação e entender melhor suas interações com outros materiais.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Obtenção e preparo do material

As matérias-primas utilizadas na produção dos painéis de partículas de média densidade consistiram em madeira de *Pinus* spp., resíduos de lã de vidro, adesivo sintético e catalizador.

O adesivo ureia-formaldeído e o catalizador sulfato de amônio foram adquiridos por fornecedor idôneo do comércio nacional. A madeira de *Pinus* spp. foi obtida no comércio local na forma de tábuas e cortadas perpendiculares às fibras, em dimensões de aproximadamente de 20 × 9 × 2 cm (Figura 1A).

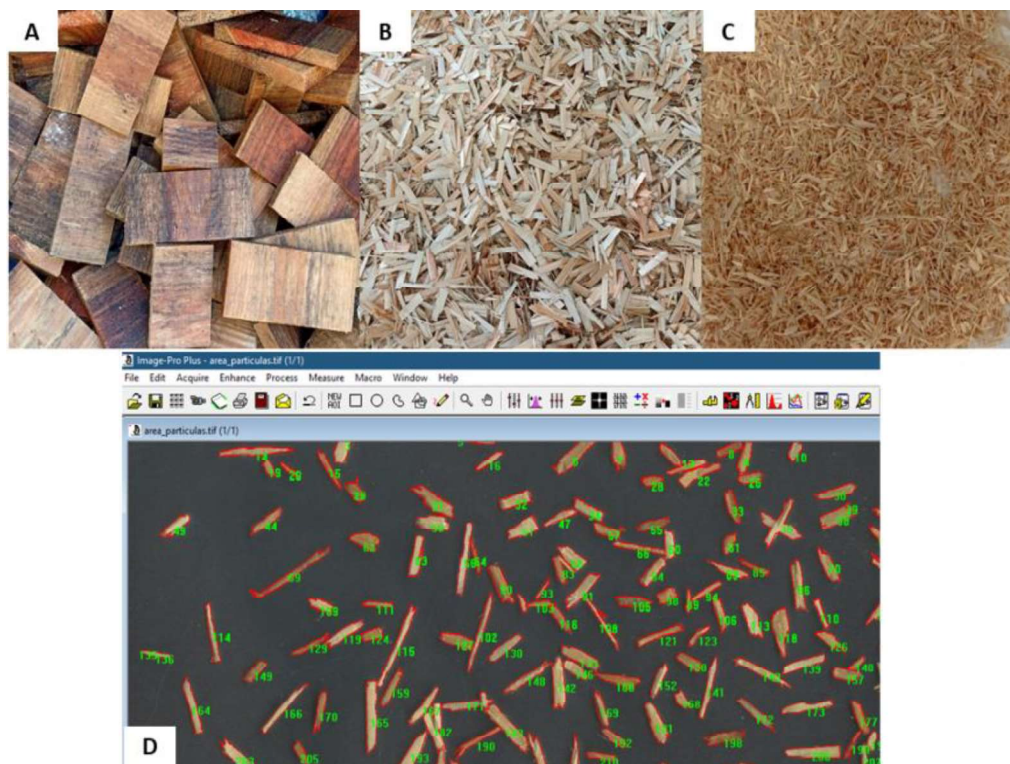


Figura 1. Processo de formação das partículas e obtenção da razão de esbeltez. A: tábuas de *Pinus* spp.; B: partículas tipo *flakes* com dimensões nominais aproximadas de 90 × 20 × 1,7 mm obtidas na orientação das fibras; C: partículas de madeira processadas e classificadas em peneira vibratória entre as malhas de 4,0 e 2,0 mm, e D: interface do *software* ImageJ utilizado para medir as dimensões das partículas.

Fonte: O Autor (2025).

Esse material ficou imerso em água até saturação completa e posteriormente cortado em um gerador de partículas (MARCONI, MA 685, Piracicaba), com dimensões nominais aproximadas de 90 × 20 × 1,7 mm (Figura 1B).

As partículas tipo *flakes* advindas do gerador foram secas ao ar até atingirem o teor de umidade de equilíbrio, processadas em um moinho de martelo (TIGRE, A4, São Paulo) e classificadas em peneira vibratória (SOLOCAP, M12, Belo Horizonte) para selecionar o material retido entre as malhas de 4,0 mm e 2,0 mm (Figura 1C). As partículas de madeira processadas e classificadas para a produção do MDP foram secas em estufa a 80 ± 2 °C até atingirem o teor de umidade médio de aproximadamente 7% e foram armazenadas em sacos hermeticamente fechados.

A lã de vidro foi obtida em ferro-velho da região sul do Espírito Santo, coletadas em refrigeradores antigos. As mantas foram cortadas em guilhotina em pedaços com aproximadamente 10 × 10 mm e, de forma manual, processou-se a limpeza do material com a remoção de impurezas ferruginosas. As amostras de lã de vidro passaram por maceração para a análises químicas do material, incluindo termogravimetria (TG), difração de Raio X (DRX) e espectroscopia de infravermelho (FTIR), conforme os padrões normativos D3171-21, E2809-22 e E1252-98, respectivamente, da *American Society for testing and Materials* - ASTM (ASTM, 2021a, 2022a, 2022b).

4.1.1 Caracterização química e física da madeira de pinus

A caracterização da madeira foi efetuada para avaliar as propriedades químicas e físicas, especialmente pH, teor de extrativos totais, de lignina e de cinzas, bem como determinar densidade da madeira e o índice de esbeltez das partículas. Todas as análises químicas foram provenientes de uma amostra composta representativa do material, sendo realizadas triplicatas.

Para determinação do pH solubilizaram-se 5g de partículas de madeira de *Pinus* spp., com base seca, em 150 mL de água destilada, sob refluxo (100 °C) por 20 minutos, e à temperatura ambiente (≈ 25 °C) por 24 horas. Para tanto, utilizaram-se partículas moídas em moinho tipo *Willey* (MARCONI, MA680/CF, Piracicaba) que ficaram retidas na peneira de 60 mesh. Em seguida foram dispostas em um Becker

com 50 mL de água destilada e mantidos sob agitação. Após calibração do pH-metro digital com soluções tampão 4, 7 e 10, obteve-se o pH inicial da solução.

Partículas foram trituradas em um moinho de facas tipo Willey, selecionando o material retido na malha 60 mesh, para determinação do teor de extrativos, conforme descrito pelo método T204 om-88, da *Technical Association of the Pulp and Paper Industry* - TAPPI (TAPPI, 2001). Utilizaram-se 2,0 gramas de amostras de cada material em extrator *Soxhlet* com solução de tolueno: etanol (2:1) durante 5 horas, etanol por 4 horas e posteriormente água quente por 1 hora. O teor de extrativos foi obtido a partir da diferença entre a massa inicial do material antes e depois de passar pelo processo de extração, ao considerar a quantidade de partículas (base seca) empregada na extração, em porcentagem. As análises do teor de cinzas foram realizadas conforme o método M11-77+ (ABTCP, 1974), por meio de 5,0 gramas de material a uma temperatura de 500 °C em mufla elétrica (MARCONI, MA685, Piracicaba).

A densidade básica da madeira de *Pinus* spp. foi avaliada a partir de amostras obtidas das tábuas adquiridas no comércio local, conforme o método de imersão em água, descrito pela NBR 11941 (ABNT, 2003), sendo realizadas cinco repetições.

A razão de esbeltez foi calculada a partir do comprimento e espessura de 250 partículas de madeira. O *software* ImageJ foi utilizado para determinar o comprimento e a área das partículas a partir de imagens digitalizadas e a espessura foi previamente medida com um micrômetro digital. As partículas de madeira foram dispostas manualmente na superfície de um *scanner* de luz transmitida (EPSON PERFECTION V750 Pro, Epson America, Long Beach, EUA), garantindo separação entre as partículas. Uma imagem em escala de cinza de 8 bits foi obtida de cada arranjo a 600 *dpi* contra um fundo preto e armazenada como formato de arquivo de imagem de tag (TIFF) (Figura 1D). Para garantir a precisão da análise, a segmentação das partículas na imagem foi realizada por limiar de cor antes da binarização.

4.1.2 Caracterização física e química do resíduo de lã de vidro

Para a determinação do índice de cristalinidade (IC) do resíduo de lã de vidro, foram realizadas análises de difração de Raio X (DRX), procedidas em um difratômetro

(RIGAKU® miniflex 600, Osaka, Japão) com radiação Cu K α ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$). As amostras em pó foram escaneadas na faixa de 2θ de 5° a 70° , com uma taxa de varredura de $2^\circ/\text{min}^{-1}$ e passo de $0,02^\circ$. O IC da lã de vidro foi estimado usando o método empírico proposto por Segal *et al.* (1959), ao considerar a relação entre a intensidade do pico cristalino associado ao plano (200) e a intensidade do halo amorfo próximo ao ângulo de $2\theta = 18^\circ$. Nesta análise, investiga-se a estrutura cristalina dos materiais, além de auxiliar na caracterização de materiais amorfos.

O comportamento de degradação térmica da lã de vidro foi verificado por análise termogravimétrica (TGA) e termogravimetria derivada (DTG) das amostras em pó. A análise foi realizada em analisador termogravimétrico (SETARAN, LabSys Evo, Caluire-et-Cuire, França) em condições de aquecimento desde a temperatura ambiente até 800°C , com taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}^{-1}$ em atmosfera de nitrogênio.

Na análise termogravimétrica (TG), avaliou-se a variação de massa da amostra em função do aumento da temperatura, que permitiu identificar variações de massa associados a fenômenos químicos ou físicos. A curva derivada termogravimétrica (DTG) complementa essa avaliação ao registrar a velocidade das variações de massa em relação à temperatura, o que facilita a detecção de pequenas alterações ou processos químicos que ocorrem em intervalos térmicos muito próximos (Denari; Cavalheiro, 2012; Pereira, 2012; Tashima, 2006).

Amostras do resíduo de lã de vidro foram caracterizadas por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) conforme metodologia específica (Delatorre *et al.*, 2023). Os espectros foram obtidos em um espectrofotômetro (BRUKER, Tensor 27, Alemanha), com faixa de frequência da região do infravermelho médio ($4000\text{--}400 \text{ cm}^{-1}$) e processadas na faixa de $4.000\text{--}600 \text{ cm}^{-1}$ com resolução de 4 cm^{-1} , ao utilizar a refletância total atenuada (ATR). Espectros foram examinados com base na literatura (Tabela 2).

Tabela 2. Relação entre o número de ondas (cm^{-1}) com os grupos funcionais observados na espectroscopia do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Número de ondas (cm^{-1})	Grupos Funcionais	Fonte
3300-3400	estiramentos de O-H e N-H	
2900-3000	vibrações de flexão de C-H	(Almeida, 2016)
1636	dobramentos de C=O	
1454	vibrações de -N-H de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	(Roumeli <i>et al.</i> , 2012)
1266	C-N e N-H de aminas secundárias	(Keinert, 2021)
1027	estiramento de C-N ou N-C-N	(Almeida, 2016)
947	alongamento de Si-O	(Piccolo, 2022)
761	vibrações de flexão de Si-O-Si	(Rubio Arias; Thielemans, 2022)

Fonte: O Autor (2025).

4.2 Preparo e avaliação dos adesivos

Para a síntese dos adesivos, foram realizados incrementos de lã de vidro como material de enchimento no adesivo ureia-formaldeído (UF) comercial. Os resíduos de lã de vidro foram incorporados em diferentes concentrações no adesivo por meio de um elemento homogeneizador, totalizando seis tratamentos (Tabela 3). Para a formulação dos respectivos adesivos com diferentes teores de enchimento, primeiramente, foi necessário a determinação da quantidade do teor de sólidos, ou seja, a quantidade de sólidos resinosos contido no adesivo UF comercial e nas respectivas concentrações de enchimento estudado.

Tabela 3. Delineamento experimental em função do percentual de carga de lã de vidro no adesivo ureia-formaldeído e nos painéis aglomerados.

Tratamentos	Teor de lã de vidro no painel aglomerado	Teor de lã de vidro no adesivo Ureia-Formaldeído
	(%)	(%)
T1	0	0
T2	0,50	3,34
T3	0,75	4,93
T4	1,00	6,52
T5	1,50	9,49
T6	2,00	12,35

Os adesivos passaram por uma análise de propriedades físicas e químicas, como pH, viscosidade, tempo de gel e teor de substâncias sólidas, com cinco repetições para cada análise.

A determinação do pH dos adesivos foi realizada por meio de um pHmetro digital (ALFAKIT, AT-355, Florianópolis). A medição foi à temperatura ambiente ($\approx 25\text{ }^{\circ}\text{C}$), e o pHmetro calibrado a pH 4, 7 e 10, com soluções tampão padronizadas. O valor do pH foi registrado após um tempo aproximado de 2 min de contato do eletrodo com a solução.

A determinação do teor de sólidos (%) nos adesivos foi realizada com base na relação peso seco (g) e úmido (g), após a homogeneização. Utilizaram-se amostras de aproximadamente 2,0 g de adesivo, mantidas em estufa sob temperatura de $103 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 12 horas.

A viscosidade dos adesivos foi determinada de acordo a designação D-1084 (ASTM, 2021b), por meio de viscosímetro digital (MARTE, MVD-8) com haste 3 e rotação de 30 rpm, com o resultado expresso em centipoise (cP). O tempo de gel da resina ureia-formaldeído pura e em mistura com enchimento foi determinado conforme descrito por Brito (1995), ao considerar o valor do teor de sólidos dos adesivos. Foi utilizado o catalisador sulfato de amônio (solução a 24%) em proporção de 2% sobre o teor de sólidos do adesivo químico.

O tempo de gel foi realizado pela adição de uma pequena massa no interior de um tubo de ensaio e com um bastão de vidro foi homogeneizado em banho-maria ($\approx 90\text{ }^{\circ}\text{C}$) até o ponto de mudança da fase líquida para gel (início do endurecimento), ao cronometrar o tempo de gel em segundos.

4.3 Produção dos painéis aglomerados

O teor de umidade das partículas foi inicialmente determinado em uma balança determinadora de umidade, à base de luz infravermelho (LABORGLAS, MOC63u, São Paulo). Com esse valor, ajustou-se a quantidade de partículas necessária para a produção de cada painel, acrescidas de 5% referente às perdas, correspondente a umidade das partículas. A proporção de adesivo foi de 12% em relação à massa seca das partículas e a homogeneização das respectivas formulações foi realizada

manualmente (Figura 2A), conforme procedimentos descritos na literatura (Dhanapal; Singh; Nagammanavar, 2024).

O colchão de partículas foi desenvolvido em uma fôrma laboratorial, formada por uma caixa de madeira sem fundo com as dimensões de 42,5 x 42,5 cm, com tampa introduzível (Figura 2B). Essa fôrma foi apoiada sobre uma chapa de alumínio e as partículas já encoladas foram distribuídas uniforme e manualmente no seu interior (Figura 2C). A pré-prensagem constituiu na aplicação de força sobre a tampa formadora, compactando e acomodando as partículas sobre a lâmina de alumínio (Figura 2D).



Figura 2. Processo de formação do painel de partículas aglomeradas. A: Homogeneização manual das formulações dos adesivos nas partículas de madeira; B: Fôrma laboratorial com as dimensões de 42,5 cm x 42,5 cm, com tampa introduzível; C: Distribuição das partículas impregnadas de adesivo na fôrma laboratorial; D: Pré-prensagem; E: Prensa hidráulica de pratos aquecidos, e F: Painel aglomerado produzido.

Fonte: O Autor (2025).

Antes da prensagem, o colchão de partículas foi disposto entre chapas de alumínio com espaçadores metálicos de 1,25 cm de altura. Os painéis foram produzidos pelo método de moldagem em compressão, a partir de uma prensa hidráulica (SOLAB, SL12, Piracicaba) de pratos aquecidos (Figura 2E). A espessura do compósito foi

estabelecida pelos espaçadores e a prensagem realizada a partir de uma temperatura de 160 °C, com uma força de compressão de 72 ton. e um tempo de prensagem de 10 min.

Após prensados e resfriados a temperatura ambiente, os painéis foram esquadrejados para a retirada das bordas e obter a dimensão final de 40 x 40 cm. Foram produzidas três amostras para cada tratamento (Figura 2F), totalizando 18 painéis, armazenados em sala climatizada (65 ± 5% de umidade relativa - UR e temperatura de 25 °C ± 3 °C) até atingirem a umidade equilíbrio de ≈ 12% (mínimo de 72 horas), conforme a NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

Os ensaios físicos e mecânicos propostos no presente trabalho e o número de repetições para cada ensaio realizado são apresentados na Tabela 4, bem como as dimensões dos corpos de prova de acordo com as respectivas normas.

Tabela 4. Dimensões, número de corpos de prova e normas associadas ao ensaio realizado.

Ensaio	Dimensões dos corpos de prova (mm)	Número de corpos de prova por tratamento	Normas
Densidade (ρRx)	50 x 50	12	
Absorção de água (AA)	50 x 50	11	
Inchamento em espessura (IA)	50 x 50	9	NBR 14810-2 (ABNT, 2018)
Flexão estática (FE _{MOE})	310 x 50	13	
Ligação interna (LI)	50 x 50	10	
Arrancamento de parafuso (AP)	50 x 50	9	
Flexão estática (FE _{MOR})	310 x 50	14	ANSI A208.1 (ANSI, 1999)
Dureza Janka (DJ)	50 x 50	11	
Inflamabilidade (Infl.)	310 x 50	13	BS EN ISO 11925-2 (ISO, 2020)
Isolamento acústico (IIS) #	400 x 400	9	*
Amortecimento (ECA) #	400 x 400	9	

*: Ensaios experimentais sem normatização específica; #: Ensaios não destrutivos da chapa quadrada antes da obtenção dos demais corpos de prova.

Fonte: O Autor (2025).

A Figura 3 ilustra a disposição em que foram retirados os corpos de prova de cada painel produzido, conforme determinação das respectivas normas de realização dos ensaios.

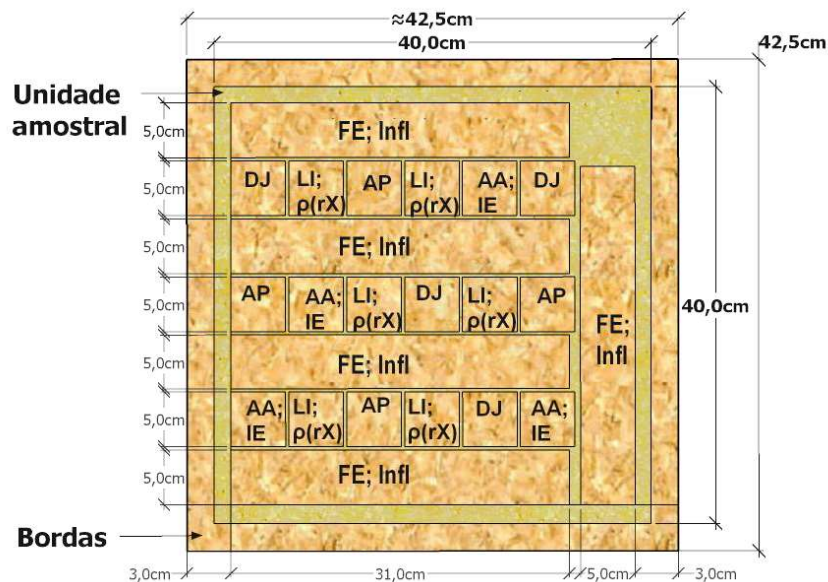


Figura 3. Disposição dos corpos de prova no painel. FE: Flexão Estática – MOE; MOR (310 x 50 mm); Infl.: Teste de Inflamabilidade; AP: Arrancamento de Parafuso (face); DJ: Dureza Janka; $\rho(rX)$: Densidade; LI: Ligação interna; AA: Absorção de água; IE: Inchamento em espessura (50 x 50 mm).
Fonte: O Autor (2025).

4.4 Propriedades físicas dos painéis aglomerados

4.4.1 Densidade (ρ) e Razão de compactação (RC)

Para a determinação da densidade utilizou-se um paquímetro e micrômetro digitais, para medir valores de comprimento, largura e espessura. A espessura foi medida em cinco posições e o volume do corpo de prova obtido. Posteriormente, os corpos de prova foram pesados em balança analítica com precisão de 0,01 g, para obter a massa. O valor da densidade aparente foi encontrado pela relação entre massa e o volume (kg/m^3).

O ensaio de densitometria de Raio X foi realizado em um densitômetro (GRECON, DAX6000, Alemanha), no Laboratório Multiusuário de Painéis, do Departamento de

Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Os corpos de prova dos painéis aglomerados foram inseridos no porta-amostra (capacidade para 6 amostras) e acoplados no compartimento interno blindado do equipamento.

Foram realizadas 12 repetições para cada um dos tratamentos definidos. Os dados foram organizados em planilha do *software* Excel®. A análise permitiu a definição dos perfis de densidade aparente do painel aglomerado, além das densidades média, máxima e mínima (QMS, 1999).

Com base nos dados obtidos pela análise de densitometria de Raio X, foram ajustadas equações para estimar a influência das densidades médias máximas e mínimas na densidade média dos painéis em cada tratamento. As equações gerais foram calculadas como médias ponderadas dos coeficientes lineares e angulares ajustados para cada tratamento. A razão de compactação foi determinada com base na densidade média dos painéis, obtida por densitometria de Raio X, e das densidades das matérias-primas utilizadas na produção, conforme suas respectivas proporções (Tabela 3).

4.4.2 Absorção de água e Inchamento em espessura

O ensaio foi realizado em 12 corpos de prova por tratamento, pela medida da espessura com micrômetro no ponto central e em quatro posições distintas nas arestas dos corpos de prova. A massa foi determinada em balança analítica. Após 24 horas de imersão em água destilada, e com o excesso de água removido com papel absorvente, as medições de espessura, massa e arestas foram repetidas.

O IE foi calculado pela diferença entre a espessura final e inicial, enquanto para a AA se baseou na comparação das massas final e inicial. As determinações seguiram os procedimentos padronizados para o ensaio de imersão em 24 horas e ambos os resultados foram apresentados em termos percentuais.

4.5 Propriedades mecânicas dos painéis aglomerados

Foram realizados ensaios mecânicos para a caracterização dos painéis, incluindo módulo de elasticidade e de ruptura em flexão estática, ligação interna, dureza

Janka e arrancamento de parafuso, conforme as normas aplicáveis (Tabela 4). Para a padronização dos resultados dos ensaios mecânicos, os valores originalmente obtidos em Kgf/cm^{-2} foram convertidos para MPa utilizando o fator de conversão de 0,0980665.

4.5.1 Flexão Estática (FE_{MOE} e FE_{MOR})

Os ensaios de flexão estática foram realizados em uma máquina universal de ensaios automatizada (EMIC®, DL10000, São José dos Pinhais) com capacidade de 10 ton. Seguiu-se a NBR 14810-2 (ABNT, 2018) para a determinação do módulo elástico (FE_{MOE}) e a ANSI A208.1 (ANSI, 1999) para os módulos de ruptura (FE_{MOR}).

4.5.2 Ligação interna

Após a junção dos corpos de prova (Figura 4A), unidos entre duas peças de madeira com adesivo acetato de ponivinila – PVA, estes foram colocados sob pressão por 72 horas para efetivação da colagem. Os corpos de prova foram inseridos em dispositivo na máquina universal de ensaios para serem submetidos ao respectivo ensaio (Figura 4B).

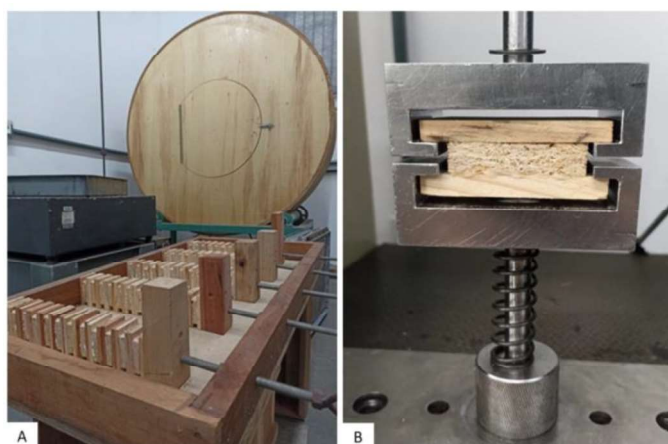


Figura 4. Prensagem dos corpos de prova (A) e ensaio de tração perpendicular às faces em máquina universal de ensaios (B).

Fonte: O Autor (2025).

4.5.3 Dureza Janka

O ensaio de dureza Janka avalia a resistência exercida pelo painel ao esmagamento com resultados em MPa. A análise consiste basicamente na aplicação de uma força com um dispositivo esférico que atua na compressão da superfície testada; essa esfera é pressionada ao centro do corpo de prova até a metade de seu diâmetro.

A penetração da esfera medindo 11,3 mm de diâmetro já acoplada na máquina universal EMIC® ocorre até uma profundidade de aproximadamente 5,65 mm, com uma compressão constante de 6 mm/min⁻¹, essa leitura de esforço é coletada pelo sistema de aquisição do próprio equipamento de ensaios.

Para tanto, corpos de prova, com dimensões de 50 × 50 mm, foram posicionados sobre uma plataforma sólida, para garantir a estabilidade durante o ensaio. Esse procedimento impede qualquer deslocamento do material fora da área de análise ou em regiões opostas ao ponto de aplicação da força.

4.5.4 Resistência ao arrancamento de parafuso (face)

Para avaliar a resistência ao arrancamento de parafuso na face, foi realizado uma furação no ponto central da face superior dos corpos de prova, utilizando uma broca comercial de 2,8 mm e profundidade de 15 mm. Em seguida, foram inseridos parafusos para madeira nº 10, com fenda tamanho 4,2 mm x 38 mm e passo da rosca de 1,4 mm, até a profundidade de 15 mm. Com os parafusos fixados, os corpos de prova foram acoplados a um dispositivo e submetidos ao ensaio na máquina universal.

A resistência dos painéis ao arrancamento do parafuso foi determinada por tração perpendicular à face do painel, com aplicação de carga a uma velocidade constante de 10 mm/min⁻¹, até a queda da força imposta e o registro do limite máximo alcançado.

4.6 Ensaio de Inflamabilidade dos painéis aglomerados

Para avaliar a inflamabilidade do material, 90 corpos de prova utilizados nos ensaios de flexão estática foram submetidos ao teste de reação ao fogo de acordo com as especificações da norma BS EN ISO 11925-2 (ISO, 2020), totalizando 15 repetições por tratamento.

As amostras foram suspensas verticalmente para o ensaio, com a parte inferior de cada corpo de prova exposta diretamente a uma chama de 18 ± 2 mm de altura gerada por um bico de Bunsen. Os corpos de prova foram posicionados a 5 mm de distância da fonte de calor, de forma que a chama incidisse uniformemente sobre a linha central e as bordas. Para padronizar a exposição, a fonte de calor foi posicionada a 4 cm acima da borda inferior de cada corpo de prova (Figura 5A).

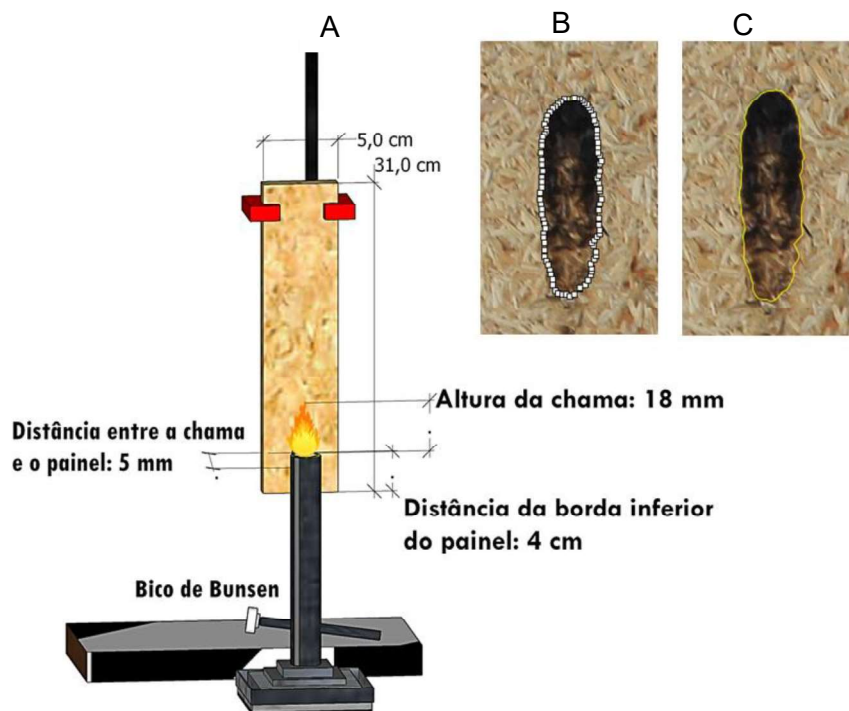


Figura 5. Ensaio de inflamabilidade. A: Exposição do corpo de prova à chama gerada no bico de Bunsen; B: subconjuntos de pontos para definição do polígono da área carbonizada após 30 segundos de exposição ao fogo; C: Determinação da área de carbonização no *software* ImageJ.

Fonte: O Autor (2025).

Após 30 segundos de exposição ao fogo (Figura 5B), a área (mm^2) e a altura (mm) chamuscada em cada corpo de prova foram medidas no *software* ImageJ. Este programa permitiu a mensuração precisa da área por meio da definição de um

polígono na imagem capturada (Figura 5 C). As medições proporcionaram dados quantitativos sobre a extensão da danificação causada pela chama, e permitiu uma análise detalhada da inflamabilidade dos painéis aglomerados.

4.7 Propriedades acústicas dos painéis aglomerados

4.7.1 Isolamento de impacto sonoro (IIS)

Para avaliar o isolamento acústico das placas quadradas de painéis aglomerados de madeira, foi construída uma câmara acústica experimental composta por uma caixa de compensado com 60 cm de altura e 35 cm de largura em cada lado (Figura 6A). A parte superior da caixa foi deixada aberta, permitindo o acoplamento das amostras de painéis a serem testadas. O interior da caixa foi revestido com caixas de ovos de papelão, para contribuir com o isolamento acústico durante o teste.

No interior do aparato, foi instalado um decibelímetro (VONDER, DDV 130, Curitiba), posicionado de forma que apenas o microfone do equipamento ficasse dentro da caixa, enquanto o *display* permanecia externo para possibilitar a leitura. A fixação do decibelímetro foi realizada por meio de um orifício projetado para garantir estabilidade e posicionamento adequado do dispositivo.

As amostras de painéis foram posicionadas na abertura superior da caixa, sob uma camada de espuma, para garantir um perfeito acoplamento (Figura 6B). Para gerar o impacto sonoro sobre as amostras, foi utilizado um suporte fixo que permitia a queda de uma esfera metálica de massa conhecida de 8,62 g de uma altura fixa e pré-determinada de 22,5 cm, para resultar um impacto controlado e reproduzível (Figura 6C).

Os valores de pressão sonora registrados foram analisados para determinar a capacidade de isolamento acústico de cada painel testado. A média dos valores (9 impactos por tratamento) em decibéis foi calculada, e a eficiência de isolamento foi comparada entre diferentes amostras com base no tratamento dos painéis.

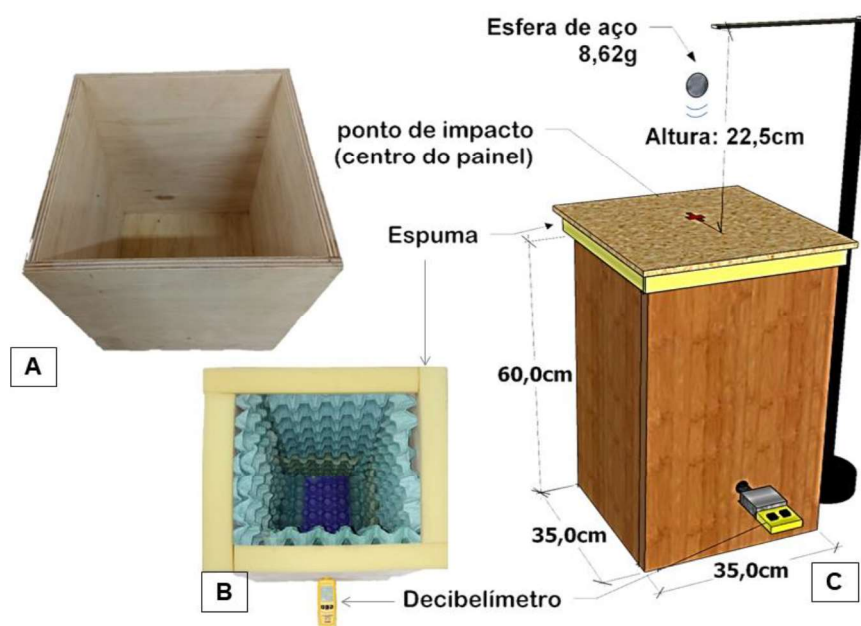


Figura 6. Teste de isolamento de impacto sonoro. A: caixa de compensado; B: câmara acústica experimental com decibelímetro acoplado; C: esquema do teste de isolamento acústico por impacto. Fonte: O Autor (2025).

4.7.2 Decremento logarítmico de amortecimento acústico (*DI*) e eficiência de conversão acústica (*ECA*)

Ensaio de vibração flexional foi realizado para determinar a eficiência de conversão acústica dos painéis aglomerados. Foram realizadas três medições para cada painel, com dimensões de aproximadamente 40 × 40 cm, representando nove repetições por tratamento. A câmara acústica experimental, descrita no item 4.7.1, serviu como suporte para as amostras. Espumas, como acessório, foram dispostas no perímetro superior da caixa para assegurar o encaixe adequado à geometria dos painéis e minimizar a dissipação sonora durante o ensaio (Figura 7A).

O ensaio de vibração transversal das chapas quadradas de partículas aglomeradas foi realizado mediante impulso na região central da superfície do painel. Excitado por um leve impacto por meio de um pulsador manual (Figura 7B), a resposta acústica foi captada na parte interna da câmara acústica por um microfone posicionado na mesma direção do impacto.

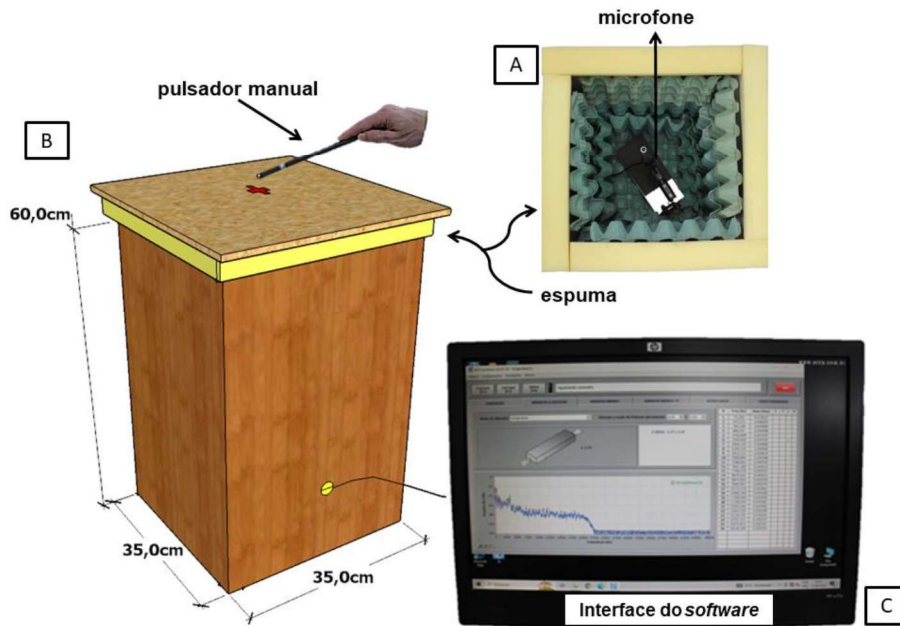


Figura 7. Ensaio de vibração para avaliar o módulo de elasticidade dinâmico na frequência flexional transversal. A: aparato experimental com microfone interno acoplado; B: esquema do ensaio para aquisição dos dados de frequência e decremento logarítmico; C: interface do *software* sonelastic®
 Fonte: O Autor (2025).

Os valores determinados pelo *software* consideram o material isotrópico e utilizou-se uma razão de Poisson (μ) de 0,25. Padronizou-se a coleta de dados no primeiro pico de frequência flexional transversal, que variou entre 190 e 205 Hz. Pelas dificuldades matemáticas encontradas no uso de expressões exatas para módulos elásticos de materiais em diferentes geometrias, aproximações são frequentemente empregadas em aplicações práticas (Ouis, 2002).

Os sinais acústicos foram processados pelo *software* Sonelastic® (ATCP) (Figura 7C), e com base nessas frequências naturais de vibração transversal, foi possível determinar os módulos de elasticidade dinâmico das amostras. Automaticamente, lista-se as frequências harmônicas e seus respectivos fatores de amortecimentos (Figura 8), calculado pelo método do decaimento logarítmico da amplitude do pico de vibração transversal (no domínio das frequências), e o amortecimento viscoelástico é usado como modelo (ATCP, 2015).

Além disso, foram calculadas propriedades acústicas secundárias, como o módulo de elasticidade dinâmico específico (E_{esp}) e a eficiência da conversão acústica (ECA), conforme descrita por Laudares *et al.* (2023).

O decremento logarítmico de amortecimento acústico descreve a dissipação de energia vibracional no material ao refletir a eficiência do painel em absorver vibrações mecânicas, enquanto a eficiência de conversão acústica (ECA) avalia o potencial do material em transformar energia vibracional em acústica (Ahmed; Adamopoulos, 2018; Arunkumar *et al.*, 2016; Assis, 2020; Laudares *et al.*, 2023; Roitman, 2021; Zatloukal; Doskočil; Tippner, 2024).

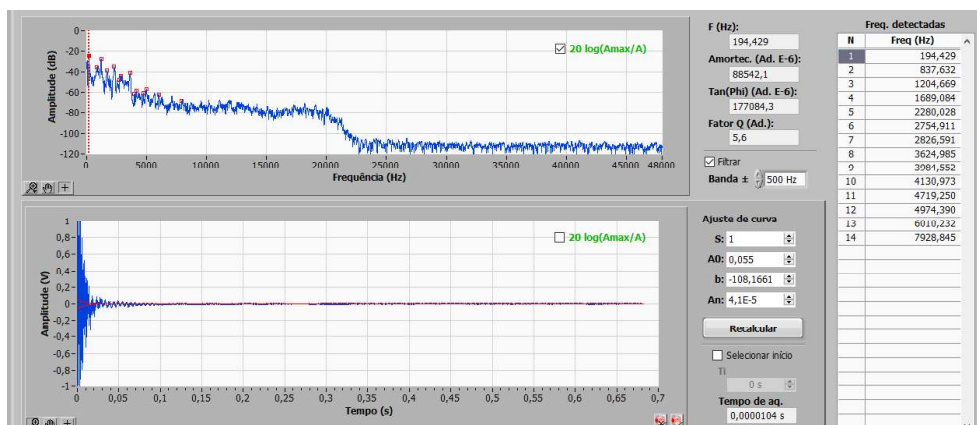


Figura 8. Interface do *software* Sonelastic ® com os picos no gráfico de amplitude e frequência, e o módulo de cálculo do amortecimento no domínio do tempo.

Fonte: O Autor (2025).

4.8 Caracterização química dos painéis aglomerados

Amostras dos painéis aglomerados foram caracterizadas pela espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) conforme metodologia descrita no item 4.1.2 (Tabela 6).

4.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microestrutura dos painéis e a relação interfacial entre UF solidificada com as partículas de lã de vidro foram examinadas em imagens obtidas de um microscópio eletrônico de varredura - MEV (JEOL, JSM-IT200, Tóquio, Japão) disponível no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo (Figura 9).

As imagens foram geradas pela aquisição de elétrons retroespalhados em amostras selecionadas aleatoriamente com dimensões de 0,5 × 0,5 × 0,5 mm. Os espécimes

foram colocados em suportes de amostra de alumínio (*stubs*) fixados com fita de carbono dupla face e revestidos com uma camada de ouro de 2 nm para análise de superfície.



Figura 9. Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos painéis aglomerados.

Fonte: O Autor (2025).

4.10 Análise estatística

As análises estatísticas foram conduzidas individualmente para cada ensaio, pela eliminação de dados discrepantes com base no intervalo interquartil (IQR) calculado a partir dos quartis 1 e 3 no Excel®. Valores fora dos limites mínimo e máximo foram considerados *outliers* e excluídos.

As análises foram conduzidas em delineamento inteiramente casualizado. Inicialmente, realizou-se a regressão na análise de variância, não apresentando significância estatística, procedeu-se à análise de variância seguida pelo teste de Scott-Knott. Ao final, foi realizada análise de agrupamento hierárquico (Cluster), análise de componentes principais (ACP) e a correlação de Pearson para sintetizar as relações entre as variáveis, permitindo identificar fatores e verificar a intensidade das associações entre os parâmetros.

As análises foram realizadas na versão demonstrativa do *software* Assistat versão 7.7 e os gráficos foram plotados no programa OriginPro 8.5. Para todos os testes, adotou-se um nível de significância de até 5% ($p < 0,05$).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características físicas e químicas das partículas de madeira

O valor médio encontrado para a densidade básica da madeira de *Pinus* spp. foi de 532 kg/m³. Segundo Maloney (1993), espécies com densidade de até 550 kg/m³ são as mais adequadas para a produção de painéis de partículas, pois alcançam uma razão de compactação entre 1,3 e 1,6. Além disso, influencia diretamente na densificação do painel, na impregnação e penetração do adesivo, bem como na ancoragem com a matriz polimérica (Frey, 2020; Furtini *et al.*, 2023; Iwakiri *et al.*, 2020a; Müzel, 2013; Ramesh *et al.*, 2022; Scatolino *et al.*, 2017).

O valor de pH obtido da madeira foi de 4,81 para solubilidade em água à temperatura ambiente (24 horas) e 4,73 para água quente. O pH é outra variável importante que influi nas propriedades físicas e mecânicas de aglomerados (Akyüz *et al.*, 2010; Albin, 1975), e na reação química das partículas de madeira com o adesivo utilizado.

Os teores médios de extrativos e de cinzas foram, respectivamente, 14,94% e 0,24%. Em função do tipo e quantidade desses extrativos, a produção do aglomerado pode demandar maior consumo de resina, alterar a taxa de cura, reduzir a resistência à umidade, além de levar a formação de bolhas no momento da prensagem (Iwakiri *et al.*, 2020a). Por fim, os teores de extrativos, com seus compostos inorgânicos, influenciam na acidez do material, prejudicando resistência e coesão da linha de cola (Iwakiri *et al.*, 2020a; Niekerk; Pizzi, 1994; Rios *et al.*, 2016). Neste trabalho, o teor de cinzas encontrado está próximo da faixa ideal de 0,5% sugerida por Iwakiri *et al.* (2020a).

A geometria das partículas, por sua vez, influenciam características essenciais como razão de esbeltez, índice de planicidade e área superficial específica que afetam importantes parâmetros de qualidade em painéis de madeira (Arabi; Faezipour; Gholizadeh, 2011; Araujo *et al.*, 2019; Haselein *et al.*, 2002; Miyamoto; Nakahara; Suzuki, 2002; Wang, 1997). A geometria das partículas influi na área de contato das partículas e no consumo de resina. Desta forma, a razão de esbeltez interfere nas

propriedades mecânicas, no acabamento, usinagem e na aplicação de revestimentos do painel (Hashim *et al.*, 2010; Iwakiri *et al.*, 2020a).

A razão de esbeltez da madeira de *Pinus* spp. encontrada neste trabalho foi de 18,7 (Tabela 4), valor condizente com a literatura (Baldin *et al.*, 2016; Arabi *et al.*, 2011). No entanto, pesquisas sugerem que maiores áreas de contato resultam em propriedades mecânicas aperfeiçoadas (Almusawi *et al.*, 2016; Hashim *et al.*, 2010).

Tabela 4. Valores médios de comprimento, espessura, área e razão de esbeltez das partículas de madeira

Comprimento médio (mm)	Espessura média (mm)	Área média das partículas (mm ²)	Razão de esbeltez
10,562 (4,49)	0,721 (0,29)	27,23 (17,81)	18,7

O teor de umidade das partículas de madeira foi de 10%, valor acima do intervalo ideal para a produção de painéis aglomerados, que geralmente varia entre 3 e 6% (Cai *et al.*, 2021; Iwakiri, 1989; Sanches, 2012; Stark; Cai, 2021; Walker *et al.*, 1993). De acordo com Iwakiri *et al.* (2020a) a umidade influencia a absorção do adesivo líquido da madeira. Portanto, conhecer o teor de umidade das partículas é fundamental para que o excesso de vapor durante o processo de prensagem não influencie de forma negativa na ligação adesiva.

5.2 Características físicas e químicas do resíduo de lã de vidro

5.2.1 Difração de Raio X

A análise do perfil de difração de Raio X (DRX) da amostra de resíduo da lã de vidro exibiu um padrão de intensidade com picos largos e difusos, e evidenciou uma estrutura amorfa do material (Figura 10).

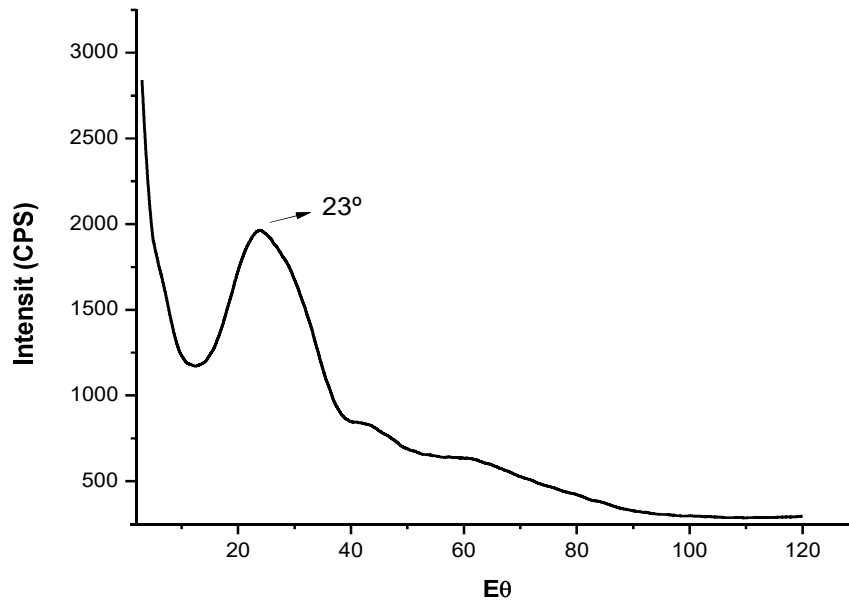


Figura 10. Padrão de difração de Raio X do resíduo de lã de vidro.

O pico de difração em 23° no espectro está associado a ligações químicas específicas dentro da composição da lã de vidro, mas a ausência de picos nítidos e bem definidos reflete a natureza não cristalina do material (Adediran *et al.*, 2021; Borges, 2007; Borges *et al.*, 2017; Evangelista *et al.*, 2012; Machado *et al.*, 2023; Yliniemi *et al.*, 2020).

5.2.2 Análise Térmica Diferencial (TGA)

Com base na curva de TG apresentada para a análise de lã de vidro (Figura 11), notam-se três eventos, o primeiro entre as temperaturas de 52 e 242 $^\circ\text{C}$, que evidencia uma leve variação de massa. Até 200 $^\circ\text{C}$, a curva da derivada termogravimétrica (DTG) exibe um pico indicativo de transição endotérmica.

O pequeno ganho de massa identificado na curva pode ser atribuído à adsorção de gases ou compostos voláteis, decorrentes de reações químicas superficiais na amostra (Rinaldelli, 2013). Estudos envolvendo óxidos minerais, especialmente em casos de fases de densificação em compósitos ou em metodologias com etapas de sulfitação, reportam fenômenos similares (Mortari *et al.*, 2010; Souza *et al.*, 2015). Além disso, é possível a presença de componentes que se desidratam na faixa de 240 - 300 $^\circ\text{C}$, que contribuem para a variação positiva de massa (Pereira, 2012).

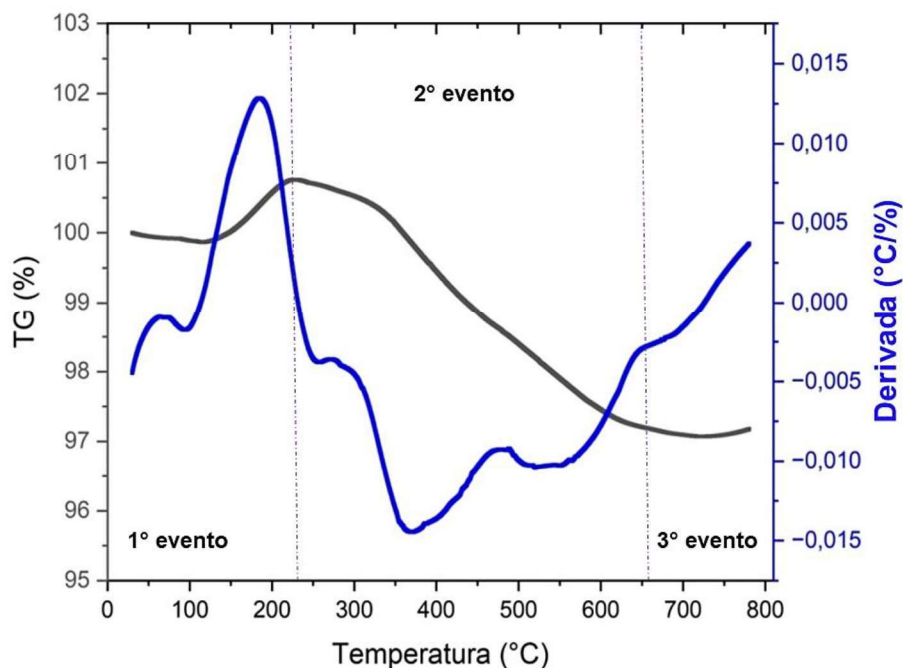


Figura 11. Curva TGA/DTG do resíduo de lã de vidro.

No segundo evento da curva de TG, especialmente acima de 302 °C, há uma redução gradual na massa que se estende até 654 °C, provavelmente associada à decomposição de ligantes e outros componentes (Boria *et al.*, 2017; Lee; Thole, 2018). Por último e acima dessa faixa de temperatura, a amostra demonstrou comportamento térmico estável, sem variação de massa considerável até a temperatura de 900 °C, o que comprova uma forte estabilidade térmica (Achchaq *et al.*, 2009).

5.3 Propriedades tecnológicas dos adesivos

Os valores médios de pH, teor de sólidos, viscosidade e tempo de gel são apresentados na Tabela 5. Em todas as análises de variância realizadas (ANOVA), os resultados foram significativos a 1% de probabilidade, com valores de p inferiores a 0,0001. Planilhas dos resumos de cálculos complementares desses ensaios encontram-se nos Apêndices A1 a A4.

Tabela 5. Valores médios de pH, teor de sólidos, viscosidade e tempo de gel nos adesivos.

Tratamento	pH	CV (%)	TS (%)	CV (%)	Visc. (cP)	CV (%)	TG (s)	CV (%)
T1 – 0%	7,91 d		62,88 c		1141,98 c		83,2 c	
T2 – 3,34%	8,20 c		67,41 b		1288,88 c		68,2 d	
T3 – 4,93%	8,15 c	1,4	63,79 c	2,2	1671,96 b	15,5	93,8 b	12,8
T4 – 6,52%	8,29 b		68,14 b		1747,26 b		67,2 d	
T5 – 9,49%	8,37 b		68,63 b		1960,16 b		78,4 c	
T6 – 12,35%	8,59 a		71,85 a		7970,72 a		111,2 a	

Tratamento: porcentagem de lã de vidro no adesivo ureia-formaldeído (UF); CV: Coeficiente de variação; TS: teor de sólidos; Visc.: viscosidade; TG: tempo de gel. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferenças estatísticas (Scott-Knott. $p < 0,05$).

Os valores de pH aumentaram progressivamente com a adição de lã de vidro à resina ureia-formaldeído, refletindo o efeito do enchimento, de caráter ligeiramente básico, sobre o pH da resina. O tratamento testemunha (T1) apresentou pH de 7,91, enquanto os tratamentos 2 a 6 variaram de 8,15 a 8,59. Apesar da acidez da madeira ser considerada alta, com pH abaixo de 5, o incremento do pH nos adesivos pode ter evitado pré-cura durante a prensagem.

Estudos evidenciam que o aumento dos valores de pH vem acompanhado de elevações na viscosidade e tempo de gel, comprometendo propriedades físicas e mecânicas (Ghani *et al.*, 2019; Kawalerczyk *et al.*, 2023). Para mitigar esses efeitos, tempos de prensagem mais longos são sugeridos para garantir a cura adequada das resinas modificadas de caráter básico (Ghani *et al.*, 2018).

O teor de sólidos dos adesivos avaliados variou de 62,88% a 71,85%, estando em sua maioria dentro do intervalo reportado para adesivos à base de ureia-formaldeído (59–66%) (Albuquerque *et al.*, 2020). Destaca-se o tratamento com 12,35% de lã de vidro com valor médio expressivamente mais elevado, evidenciando o impacto do enchimento na formulação da resina.

A elevação do teor de sólidos pode melhorar a rigidez e a adesão, mas níveis excessivos aumentam a viscosidade e dificultam o processamento, especialmente na aplicação (Pizzi, 2003c). Moslemi *et al.* (2020) atribuíram efeitos de teor de sólidos na modificação do tempo de gel em adesivos UF modificados com nanofibras de celulose, dando ênfase nas concentrações de reagentes.

O tempo de gel variou entre 67,2 e 111,2 segundos, sem apresentar uma tendência em relação ao aumento dos teores de lã de vidro na formulação dos adesivos. Apesar do caráter básico da lã de vidro, com menor reatividade, sugerir um aumento progressivo no tempo de gel, os resultados indicam influência de outros fatores, como a interação química com o adesivo e variações no grau de dispersão da carga. Neste estudo, a adição do enchimento ao adesivo UF resultou em um aumento progressivo na viscosidade. O tratamento com 3,34% de lã de vidro não diferiu estatisticamente da testemunha. No entanto, tratamento com 12,35% de carga apresentou valores expressivamente superiores. Durante o desenvolvimento deste estudo, observou-se dificuldade para a dispersão dos adesivos nas partículas de madeira, evidenciando a inviabilidade de pulverização, exigindo assim outro modo de aplicação.

Todos os tratamentos excederam o intervalo típico de viscosidade para adesivos à base de ureia-formaldeído (300 a 1000 cP) conforme Albuquerque *et al.* (2020), com o tratamento de 12,35% ultrapassando até mesmo o limite superior recomendado para adesivos em painéis compensados, que varia de 4000 a 6500 cP (Almeida, 2009).

O aumento da viscosidade com a adição de enchimento está diretamente relacionado ao teor de sólidos e às interações moleculares durante a formulação do adesivo, provavelmente influenciada pelos ligantes formofenólicos da lã de vidro (Achchaq *et al.*, 2009). O uso de cargas, como celulose microfibrilada e nanopartículas, tem sido eficaz para otimizar a viscosidade das resinas, melhorando a penetração e o desempenho mecânico (Hosseini *et al.*, 2020; Mahrtdt *et al.*, 2016; Veigel *et al.*, 2011).

Outras nanopartículas, como nano-SiO₂ e nanoargilas, também influenciam significativamente a viscosidade e a reatividade das resinas. A introdução de até 2% de nanoargila preservou a fluidez do adesivo, mas concentrações superiores causaram aumento substancial na viscosidade, restringindo sua viabilidade (Lei *et al.*, 2008).

Estudos para avaliar a interação da UF com nanopartículas de sílica concluem que adições em baixos níveis (até 2%) podem melhorar a ligação interna e minimizar a permeação excessiva do adesivo em painéis de madeira (Roumeli *et al.*, 2012). Salari *et al.* (2013), corroboram com tal informação para a qualidade de painéis de

partículas orientadas (*oriented strand board* – OSB) produzidos com UF e nanopartículas de sílica. Os autores associam os grupos silanol do nano-SiO₂ às reações de condensação, formando ligações de hidrogênio que afetam a química da resina UF. Esses resultados evidenciam que a escolha e o controle das cargas são essenciais para equilibrar fluidez, adesão e desempenho final dos compósitos.

5.4 Propriedades físicas dos painéis aglomerados

5.4.1 Densidade e Razão de compactação (RC)

A análise de variância da densidade aparente dos painéis aglomerados, para os diferentes teores de lã de vidro, não revelou diferenças estatisticamente ($p > 0,05$), assim como o teste de Scott-Knott (Apêndice B1). Para os painéis com densidade nominal de 700 kg/m³, valores entre 712 e 732 kg/m³ representam um acréscimo de até 4,6% em relação ao parâmetro planejado (Tabela 6).

Tabela 6. Valores médios de densidade aparente dos painéis produzidos, para diferentes proporções de lã de vidro adicionada ao adesivo ureia-formaldeído

Tratamento	Densidade [kg/m ⁻³]	Desvio Padrão	Estatística do teste F
T1 – 0%	726,3	41,58	0,5282 ^{ns}
T2 – 3,34%	730,0	18,85	
T3 – 4,93%	718,3	28,65	
T4 – 6,52%	712,9	11,19	
T5 – 9,49%	725,2	19,97	
T6 – 12,35%	732,1	42,01	
Média	724,1		

^{ns}: não significativo ($p > 0,05$).

Com base nos dados obtidos pela análise de densitometria de Raio X, as equações ajustadas para as densidades máxima e mínima apresentaram valores de inclinação próximos a 1, o que indica uma relação linear estável ao longo dos tratamentos (Tabela 7). Planilha de cálculos complementares das equações gerais máximas e

mínimas encontra-se nos Apêndices B2 e B3, respectivamente. Os resultados indicam que, independentemente do teor de lã de vidro nos adesivos, que diferem os tratamentos, o comportamento geral da densidade ao longo da espessura dos painéis seguiu o padrão esperado.

A análise prática desses modelos permite avaliar parâmetros de qualidade estrutural dos painéis sem a necessidade de medições individualizadas para cada tratamento. Além disso, a alta linearidade observada reforça a confiabilidade das técnicas de densitometria de Raio X como ferramenta de análise não destrutiva para caracterização de materiais compostos (Gonçalves *et al.*, 2018).

Tabela 7. Equações ajustadas para avaliar a influência das densidades médias máximas e mínimas na densidade média estimada dos painéis aglomerados

Tratamento	Densidade Max. Equação estimada	R ²	Densidade Mín. Equação estimada	R ²
T1 – 0%	$\hat{Y} = 16,033 + 0,8600 * X_{max}$	0,97	$\hat{Y} = 34,632 + 1,0575 * X_{min}$	0,95
T2 – 3,34%	$\hat{Y} = 49,559 + 1,0737 * X_{max}$	0,95	$\hat{Y} = -47,680 + 0,9636 * X_{min}$	0,96
T3 – 4,93%	$\hat{Y} = 238,78 + 0,8224 * X_{max}$	0,85	$\hat{Y} = -31,360 + 0,9289 * X_{min}$	0,95
T4 – 6,52%	$\hat{Y} = 130,49 + 0,9621 * X_{max}$	0,94	$\hat{Y} = -45,492 + 0,9547 * X_{min}$	0,98
T5 – 9,49%	$\hat{Y} = 50,722 + 1,0818 * X_{max}$	0,80	$\hat{Y} = -51,238 + 0,9586 * X_{min}$	0,93
T6 – 12,35%	$\hat{Y} = 14,908 + 1,1100 * X_{max}$	0,92	$\hat{Y} = -25,370 + 0,9287 * X_{min}$	0,97
Geral	$\hat{Y} = 95,780 + 1,01102 * X_{max}$	0,87	$\hat{Y} = -41,612 + 0,9503 * X_{min}$	0,94

Tratamento: porcentagem de lã de vidro no adesivo ureia-formaldeído. R²: Coeficiente de determinação que indica a proporção da variabilidade na variável dependente explicada pelo modelo. \hat{Y} : Densidade média estimada; X_{max} : Densidade média máxima; X_{min} : Densidade média mínima; *: significativo ($p < 0,05$).

A diferença significativa entre os coeficientes lineares das densidades máxima e mínima destaca a heterogeneidade na distribuição da densidade, o que é consistente com os resultados apresentados em estudos similares sobre painéis de madeira reconstituída (Wong *et al.*, 1999).

O perfil de densidade descreve a variação da densidade do painel ao longo de sua espessura (Gonçalves *et al.*, 2018). As camadas externas dos painéis reconstituídos, especialmente durante a prensagem a quente, resultam em maior adensamento das superfícies em ambas as faces do painel, enquanto a camada interna apresentam menor densidade (Duran *et al.*, 2023; Si; Zheng; Li, 2022;

Wronka; Kowaluk, 2022). Assim, cria-se um perfil de densidade em forma de “M” ao longo da espessura do corpo de prova (Figura 12).

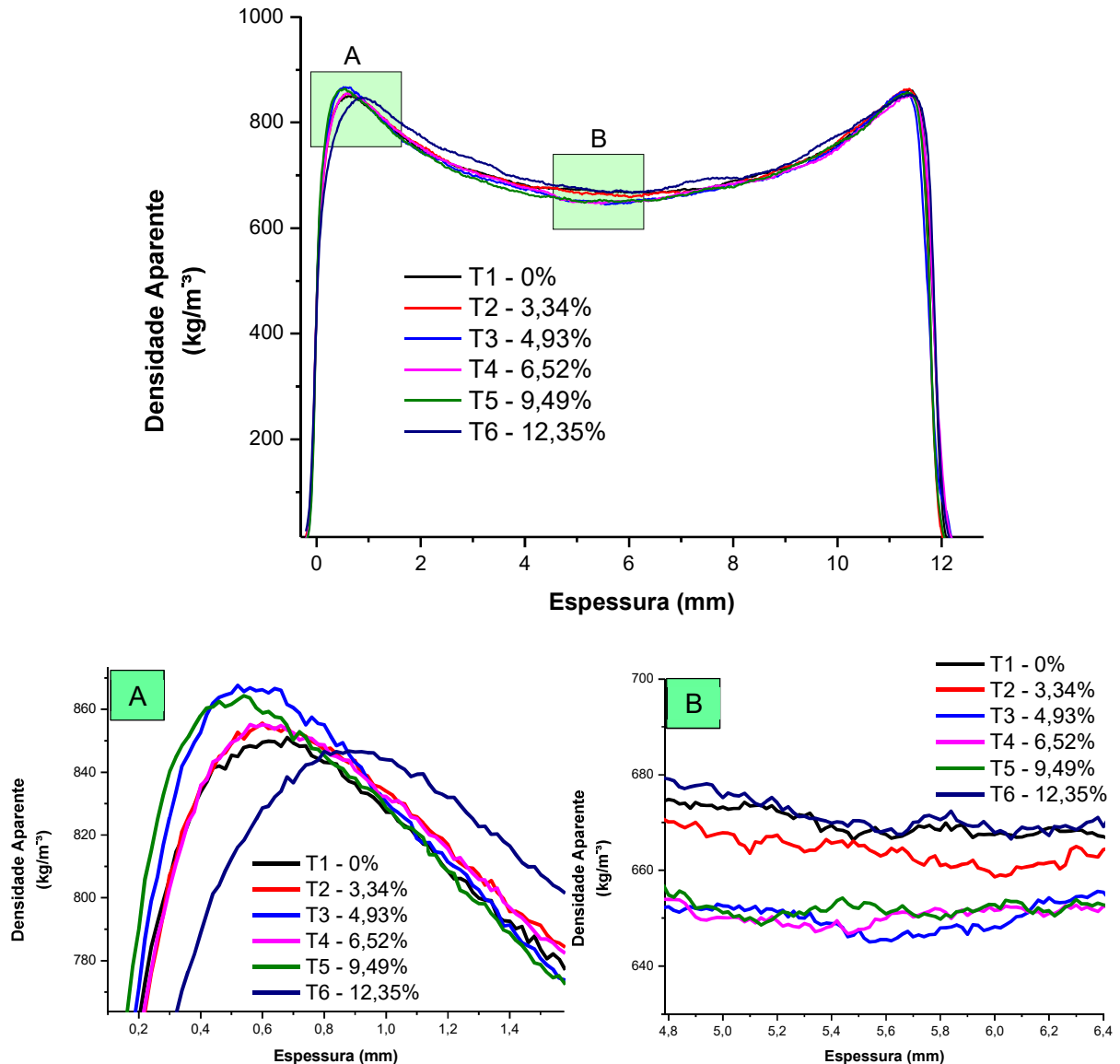


Figura 12. Perfis de densidade aparente ao longo da espessura dos painéis aglomerados em função do teor de lã de vidro adicionada ao adesivo ureia-formaldeído (UF). A: Face superior do painel; B: Região central do painel.

Pesquisas anteriores demonstraram que a densidade influencia não apenas as propriedades mecânicas, mas também a eficiência de adesão e a estabilidade dimensional dos painéis (Balea *et al.*, 2022; Nemli; Demirel, 2007; Wong *et al.*, 1999, 2020). Além disso, a densidade da camada superficial nos painéis reconstituídos de madeira influencia a resistência ao fogo (Albert; Liew, 2024; Harada; Uesugi; Masuda, 2006; Najahi *et al.*, 2023).

A uniformidade observada nas inclinações das equações, bem como o comportamento do perfil de densidade aparente, comprova um controle efetivo no processo de fabricação dos painéis, fornecendo um comportamento estrutural consistente. Esses resultados destacam a importância do controle da densidade como um parâmetro crítico na fabricação de painéis, uma vez que ela está diretamente relacionada à qualidade e ao desempenho final dos produtos (Chaydarreh *et al.*, 2022; Dukarska *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2021).

A razão de compactação dos painéis apresentou uma leve redução em função do aumento da proporção de lã de vidro incorporada ao adesivo ureia-formaldeído, conforme a regressão linear ($p < 0,01$) (Figura 13 – Apêndice B4).

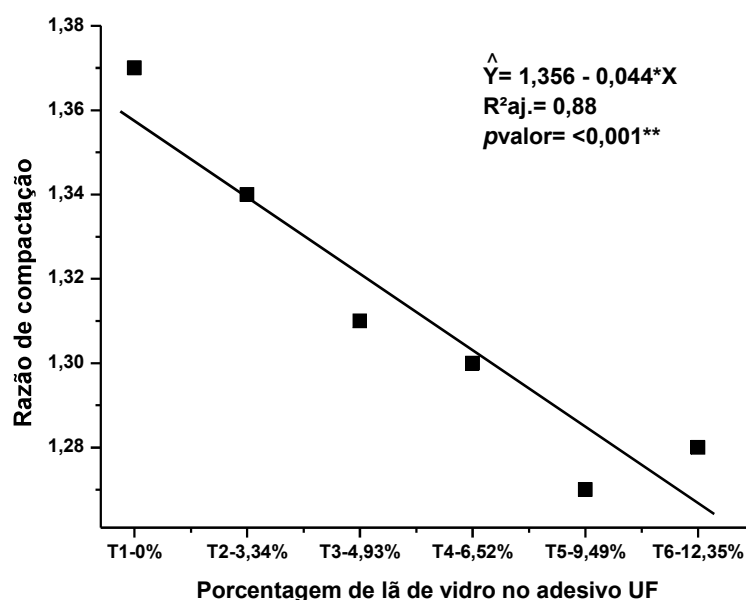


Figura 13. Comportamento da razão de compactação dos painéis aglomerados em função da porcentagem de lã de vidro adicionada ao adesivo ureia-formaldeído (UF). **: significativo a 1% de probabilidade; \hat{Y} : razão de compactação estimada; X: porcentagem de lã de vidro adicionada ao adesivo ureia-formaldeído (%); $R^2_{aj.}$: R-quadrado ajustado; p valor: probabilidade associada.

Os valores médios de razão de compactação (RC) variaram de 1,37 a 1,27 (tratamentos T1 e T5, respectivamente). Embora a regressão aponte uma tendência linear decrescente, a amplitude dessa variação indica que a adição de lã de vidro ao adesivo exerce influência moderada sobre esse parâmetro. Mesmo nos tratamentos com maiores teores de enchimento, os resultados mantiveram-se próximos ao limite mínimo recomendado de 1,3 (Araújo *et al.*, 2019; Bianche, 2009; Brito *et al.*, 2023).

Com base nos resultados, infere-se que maiores proporções do material de enchimento reorganiza os elementos internos estruturais do painel e preenchem espaços com baixa interferência na densificação. A densidade elevada das partículas de lã de vidro em relação à madeira, o baixo teor de enchimento na composição final do produto e a característica friável do material incorporado são fatores determinantes para explicar desempenhos em níveis de compactação.

5.4.2 Absorção de água e Inchamento em espessura

Nos ensaios de absorção de água (AA) e inchamento em espessura (IE) após 24h de imersão, a análise de regressão linear demonstrou que a adição de lã de vidro ao adesivo UF impactou significativamente as propriedades físicas dos painéis aglomerados ($p < 0,05$). As variáveis de AA e IE foram lineares e crescentes de acordo com a proporção de lã de vidro incorporada (Figura 14A e Figura 14B), com R^2 de 0,865 e 0,716, respectivamente (Apêndices B5 e B6).

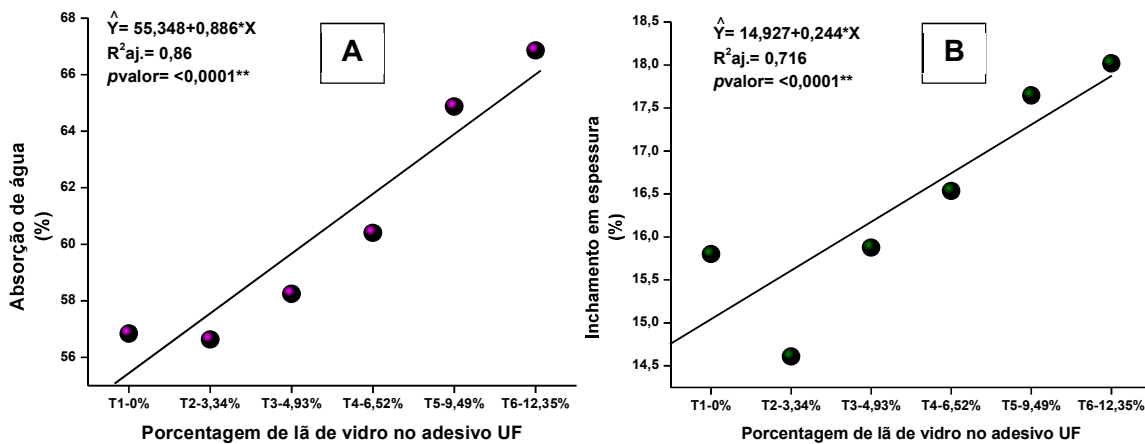


Figura 14. Relação entre a absorção de água (A) e o inchamento em espessura (B) dos painéis aglomerados em função da porcentagem de lã de vidro adicionada ao adesivo ureia-formaldeído (UF). **: significativo a 1% de probabilidade; *: significativo a 5% de probabilidade; \hat{Y} : absorção de água estimada (%); X: porcentagem de lã de vidro adicionada ao adesivo ureia-formaldeído (%); $R^2_{aj.}$: R-quadrado ajustado; p valor: probabilidade associada ao teste.

Painéis com maiores percentuais de resíduos de lã de vidro incorporados ao adesivo UF apresentaram maior absorção de água e inchamento em espessura. O incremento do resíduo afetou a interação adesiva e a morfologia estrutural do painel,

sugerindo variações na dispersão e no contato entre o adesivo e as partículas, favorecendo a formação de ligações higroscópicas.

Os resultados mostraram uma absorção de água entre 56,6% e 66,8%, com diferenças significativas apenas acima de 6,52% de lã de vidro, corroborando a hipótese de maior porosidade. Vale ressaltar que o alto teor de extrativos obtidos das partículas de *Pinus* spp. interfere na higroscopicidade e permeabilidade do painel, haja visto que altos teores desses compostos dificultam a colagem das partículas, resultando em baixa resistência de adesão (Brito; Bortoletto; Paes, 2021; Furtini *et al.*, 2023; Hse; Kuo, 1988; River; Vick; Gillespie, 1991).

Estudos, como os de Peixoto e Brito (2000) e Haselein *et al.* (2002), destacam que partículas de madeira mais finas reduzem espaços vazios no interior das chapas, o que contribui para melhor desempenho hidrofóbico, considerando menor área disponível para absorção de água. Partículas menores também apresentam maior área superficial, demandando quantidades relativamente maiores de adesivo para alcançar uma completa distribuição do adesivo nas partículas (Bazzetto *et al.*, 2019; Mustefaga *et al.*, 2024).

Nesse contexto, e ao considerar a baixa razão de esbeltez das partículas utilizadas na produção dos painéis, é possível sugerir que os tratamentos com maiores teores de enchimento, e conseqüentemente uma menor proporção de UF, tenham prejudicado a distribuição uniforme do ligante entre as partículas.

Os resultados de IE, com tendência semelhante às propriedades de absorção de água, apresentaram valores entre 14,61% e 18,02%, com o tratamento 2 apresentando melhor estabilidade dimensional. Isso sugere que o acréscimo, mesmo que em pequenas quantidades de lã de vidro na UF contribuiu para melhorias nas propriedades físicas dos painéis aglomerados (Figura 14).

Os Tratamentos 5 e 6, de maior percentual de lã de vidro, apresentaram os maiores valores de IE (17,65 e 18,02 %, respectivamente). Ainda assim, os valores de IE obtidos neste trabalho foram próximos ao estipulado pela NBR 14810-2 (ABNT, 2013) que limita em 18% o inchamento em espessura após 24h de imersão em água.

Bazzetto *et al.* (2019) explica que o inchamento em espessura nos painéis pode ser atribuído à liberação de tensões de compressão, que tendem a aumentar em função da taxa de compactação. Por outro lado, quantidades maiores de adesivo em

painéis reduzem valores de inchamento em espessura (Ayrilmis; Nemli, 2017; Iwakiri *et al.*, 2012c). Logo, uma diminuição na cobertura da linha de cola pode gerar pontos de maior absorção de água e um desempenho inferior na estabilidade dimensional do painel.

O bom desempenho dos painéis avaliados em comparação com os resultados da revisão (Tabela 8), que reúne estudos sobre as propriedades de estabilidade dimensional (absorção de água e inchamento em espessura), reforça a importância da parafina, a influência das matérias-primas, condições de processamento e parâmetros de produção.

Tabela 8. Revisão bibliográfica da absorção de água (AA) e inchamento em espessura (IE) de painéis aglomerados produzidos com diferentes espécies de madeira e adesivos

Painel	Adesivo	Madeira	Propriedades		Fonte
			AA (%)	IE (%)	
Agl	UF + ep	<i>Pinus taeda</i> L. (cascas)	78,24	20,65	(Luckman <i>et al.</i> , 2021)
Agl	UF	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	115,80	38,70	(Souza <i>et al.</i> , 2023)
Agl	UF	<i>Pinus oocarpa</i>	≈77	≈11	(Narciso <i>et al.</i> , 2021)
Agl	UF		104,03	21,3	(Furtini <i>et al.</i> , 2023)
Agl	UF	<i>Pinus patula</i>	118,5	26,75	(Rios <i>et al.</i> , 2016)
Agl	UF + ep	<i>Pinus taeda</i>	29,66	9,96	(Iwakiri <i>et al.</i> , 2020b)
Agl	UF + ep	<i>Toona ciliata</i>	40,86	12,74	(Trianoski <i>et al.</i> , 2014)
Agl	UF	<i>Pinus oocarpa</i>	65,05	22,46	(Brito <i>et al.</i> , 2022)
Agl ³	UF	<i>Pinus brutia</i>	-	14,22	(Baharoğlu <i>et al.</i> , 2013)
Agl ³	UF	<i>Pinus sylvestris</i>	≈82	≈29	(Wronka; Kowaluk, 2022)
Agl ³	UF + ep		83,2	19,9	(Benthien <i>et al.</i> , 2019)
Agl	UF	<i>Pinus</i> spp. + <i>choupo</i>	100	54	(Karagianidis <i>et al.</i> , 2020)
Agl	UF	<i>Pinus pinaster</i>	91,54	13,4	(Benhamou <i>et al.</i> , 2022)
Agl	UF	Pinho + Choupo	-	21,4	(Onat; Kelleci, 2022)
Agl	UF	<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	96,79	28,38	(Nuryawan <i>et al.</i> , 2020)
Agl	UF		46,07	28,01	(Ghani <i>et al.</i> , 2018)
Agl	UF	Seringueira	89,47	29,36	(Sulaiman <i>et al.</i> , 2018)
Agl	UF + NH ₄ Cl		46,74	28,49	(Ghani <i>et al.</i> , 2019)

AA: absorção de água (24h); IE: inchamento em espessura (24h); Agl: painel aglomerado; Agl³: painel aglomerado com 3 camadas; UF: ureia-formaldeído; ep: emulsão de parafina; -: não encontrado; ≈: valor aproximado.

Vale ressaltar que o adesivo UF, conforme descrito por Pizzi e Mital (2003a), com sua elevada higroscopicidade, requer incorporação de parafina para aprimorar suas propriedades físicas de absorção de água e inchamento em espessura. Portanto, é crucial equilibrar a formulação do adesivo com as características do material para garantir adesão eficaz e melhorar propriedades físicas dos painéis.

De maneira geral, a diminuição na porcentagem de ureia-formaldeído em função do aumento de carga de lã de vidro pode ter comprometido o umedecimento eficiente das partículas de madeira. Com a elevada área superficial do material de enchimento a demanda do adesivo aumenta, o que influi em menor umedecimento das partículas de madeira (França *et al.*, 2016; Sozim *et al.*, 2019).

5.5 Propriedades mecânicas dos painéis aglomerados

5.5.1 Módulo de elasticidade (FE_{MOE}) e de ruptura (FE_{MOR})

Os resultados do módulo de elasticidade dos painéis (Figura 15A), obtidos por meio do ensaio à flexão estática, indicaram que a adição de lã de vidro na resina ureia-formaldeído não causou diferenças significativas nos tratamentos (Apêndice C1).

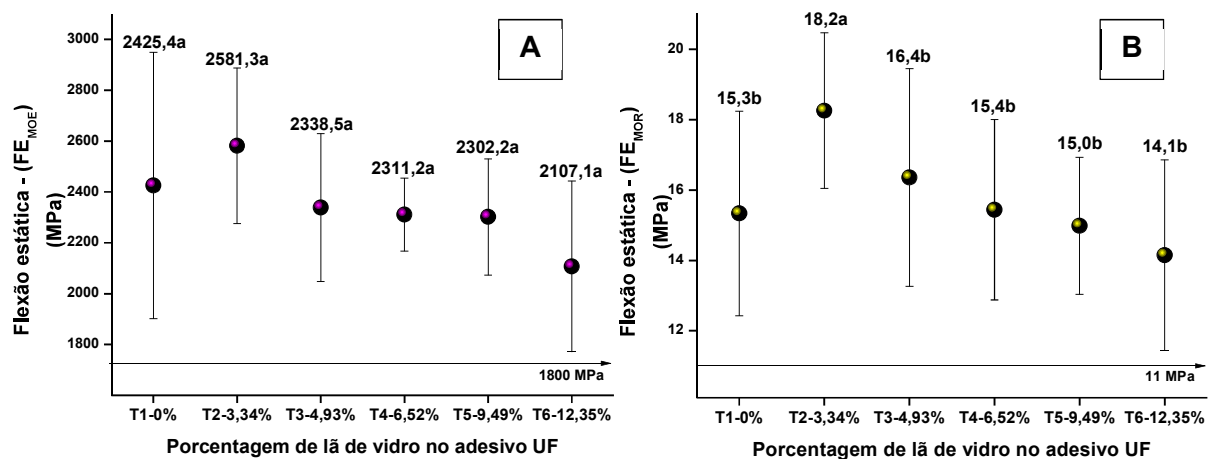


Figura 15. Valores médios de módulos de elasticidade (FE_{MOE}) (A) e ruptura (FE_{MOR}) (B) de painéis aglomerados em função da porcentagem de lã de vidro adicionada ao adesivo ureia-formaldeído (UF). Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente (Skott-Knott, $p > 0,05$).

A análise de variância (ANOVA) foi eficaz a 5% de probabilidade, assim como o teste Skott-Knott, com valores de $p = 0,0169$ e $CV = 13,92\%$. O FE_{MOE} variou de 2107,1 MPa a 2581,3 MPa, e a melhor eficácia ocorreu com 3,34% de lã de vidro no adesivo. De forma geral, todos os tratamentos atingiram os valores mínimos exigidos pela NBR 14810-2 (ABNT, 2024) que é 1800 MPa.

Os resultados podem ser atribuídos à metodologia de produção dos painéis. A homogeneização manual das partículas garantiu uma melhor distribuição do adesivo, e contribuiu para a uniformidade das propriedades mecânicas dos painéis, mesmo aqueles produzidos com adesivos de baixa fluidez.

Para o ensaio do módulo de ruptura, a análise de variância (ANOVA) foi eficiente para avaliar a variabilidade estatística entre os tratamentos a 1% de probabilidade ($p = 0,002$) e F crítico 3,2626 (Apêndice C2). A média das resistências à flexão estática (FE_{MOR}), agrupada pelo teste Skott-Knott (a 5% e CV de 16,5%), apontou o tratamento com 3,34% de lã de vidro como o único estatisticamente diferente (Figura 15B).

O painel com melhor desempenho apresentou um aumento significativo no módulo de ruptura, com valor médio de 18,2 MPa. No geral, os valores médios variaram de 14,1 a 18,2 MPa, superando o exigido pela NBR 14810-2 (ABNT, 2018), que é de 11 MPa. Portanto, a adição em proporções reduzidas de lã de vidro aumentou a rigidez dos painéis, enquanto quantidades maiores não mostraram alteração no desempenho.

Contudo, considerando que o incremento de cargas na formulação de resinas influencia as propriedades do adesivo, a lã de vidro demonstrou ser um material de enchimento capaz de preservar a adesão e a transferência de tensões do adesivo UF, garantindo a rigidez estrutural dos painéis. Na Tabela 9 consta a comparação dos módulos de elasticidade e ruptura obtidos na literatura.

Vale ressaltar que os estudos citados avaliam uma variedade de parâmetros que influenciam a produção de painéis aglomerados, como a temperatura de prensagem, o tempo e a força de pressão, os tipos de adesivos e as matérias-primas utilizadas. Além desses fatores, outros parâmetros como a umidade da madeira, a proporção de enchimento no adesivo, o tipo de partícula utilizada e sua geometria também foram critérios estudados para avaliar o desempenho mecânico dos painéis avaliados.

Tabela 9. Indicação de alguns trabalhos relatando o Módulo de elasticidade (FE_{MOE}) e Módulo de ruptura (FE_{MOR}) na flexão estática em painéis reconstituídos de madeira

Painel	Adesivo	Madeira	Propriedades		Fonte
			FE_{MOE} (MPa)	FE_{MOR} (MPa)	
Agl.	UF	<i>Ochroma pyramidale</i>	881,0	8,6	(Stange <i>et al.</i> , 2024)
Agl.	UF	<i>Eucalyptus</i> spp.	1929,37	11,85	(Lima <i>et al.</i> , 2023)
Agl.	UF	<i>Pinus oocarpa</i>	1087,2	6,86	(Furtini <i>et al.</i> , 2023)
Agl.	UF	<i>Tachigali vulgaris</i>	215,74	2,4	(Bezerra <i>et al.</i> , 2023)
Agl.	UF	<i>Pinus</i> spp.	2613,6	15,6	(Vigna <i>et al.</i> , 2024)
Agl.	PUR	<i>Pinus oocarpa</i>	589	6,75	(Herradon <i>et al.</i> , 2023)
Agl.	PUR	<i>Pinus caribaea</i>	1831	11,21	(Souza <i>et al.</i> , 2023)
MDF	UF	Abeto e Pinheiro	1800	17,5	(Moslemi <i>et al.</i> , 2020)
Agl.	UF	Seringueira	≈1724	≈13,8	(Aizat <i>et al.</i> , 2019)
MDF	PAE	<i>Pinus radiata</i>	1820	13,5	(Lee <i>et al.</i> , 2023)
Agl.	LCNF	Resíduos de tamareira	949,9	10,38	(Najahl <i>et al.</i> , 2023)
Agl.	pMDI	<i>Eucalyptus urograndis</i>	2121	13,58	(Chaydarreh <i>et al.</i> , 2022)
Agl.	UF	Podas de videira	1390	13,6	(Ferrandez <i>et al.</i> , 2020)
Agl.	PVA	<i>Manilkara</i> spp.	28,65	0,27	(Alexandre; Castro, 2022)
Agl.	UF	Cana e linho	1722	11,76	(Darwish; Eldeeb, 2024)
Agl.	rPP	<i>Pinus</i> spp.	581	14	(Anosike <i>et al.</i> , 2022)
Agl.	CA	Talos de milho	2460	7,34	(Astari <i>et al.</i> , 2024)
Agl.	PUR	<i>Pinus elliottii</i>	≈2000	≈14	(Cazella <i>et al.</i> , 2024)

Agl.: painel aglomerado homogêneo; MDF: *medium density fiberboards*; UF: ureia-formaldeído; ep: emulsão de parafina; LCNF: Nanofibras lignocelulósicas; PUR: Resina poliuretano; PAE: proteína e poliamida amina epiclorigrina; rPP: Polipropileno reciclado; pMDI: Poliisocianato de polimetileno polifenil; CA: Ácido cítrico; -: não encontrado; ≈: valor aproximado.

5.5.2 Ligação interna

A análise de variância mostrou efeito significativo na interação da composição do adesivo com a propriedade de resistência à tração perpendicular dos painéis ($p < 0,0001$) e F crítico de 3,3778 (Apêndice C3). O Teste de Scott-Knott, a 5% de

probabilidade e CV de 11,57%, evidenciou que o Tratamento com 3,34% de lã de vidro obteve o melhor resultado (Figura 16).

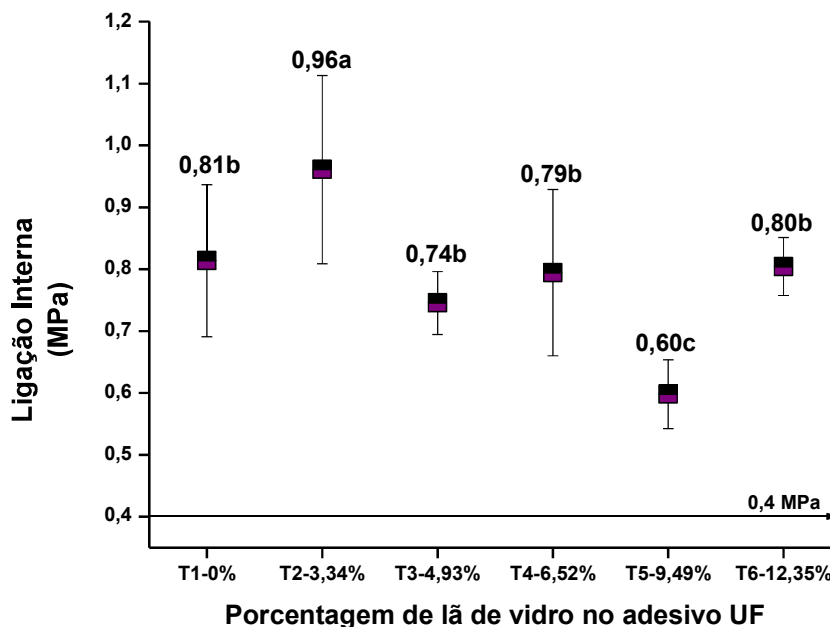


Figura 16. Valores médios de resistência à ligação interna de painéis aglomerados em função da porcentagem de lã de vidro adicionada ao adesivo ureia-formaldeído (UF). Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente (Skott-Knott, $p > 0,05$).

Os valores médios variaram de 0,60 a 0,96 MPa, com todos os tratamentos dentro dos limites estabelecidos pela ANSI A208.1 (ANSI, 1999) que admite valores entre 0,15 a 0,40 MPa. Isso sugere que, nessas proporções, a lã de vidro foi compatível com a matriz de ureia-formaldeído, permitindo a manutenção das interações químicas e mecânicas necessárias para a integridade estrutural dos painéis.

O tratamento com 0% de enchimento não diferiu estatisticamente dos tratamentos com 4,93, 6,52 e 12,35% de lã de vidro na composição do adesivo. Apenas o tratamento com 9,49% de lã de vidro se diferenciou estatisticamente do grupo de forma negativa. Valores reduzidos observados para a tração perpendicular evidenciam a relevância da interação entre as partículas e o adesivo empregado. Esse parâmetro está intrinsecamente associado às propriedades físico-mecânicas, e reflete diretamente a qualidade da ligação interna no material (Baldin *et al.*, 2016).

O desempenho inferior do tratamento com 9,49% de lã de vidro sugere uma possível incompatibilidade interfacial ou desestabilização da matriz adesiva, comprometendo a adesão e a transferência de tensões. Esse efeito pode estar associado à

interferência na dispersão homogênea da resina, favorecendo a formação de grumos, que reduzem a eficácia da ligação entre os componentes e podem gerar regiões de menor coesão estrutural.

Esses dados reforçam a importância de um equilíbrio adequado na formulação das resinas, em que a proporção de material de enchimento deve ser ajustada para maximizar as propriedades mecânicas sem comprometer a coesão e estrutural do produto final.

Estudos indicam que a resistência à tração perpendicular em painéis aglomerados varia conforme o método de produção, a formulação do adesivo e os aditivos empregados. Para painéis com densidade nominal de 700 kg/m^3 , 12% de adesivo e 1,5% de emulsão de parafina, Luckman *et al.* (2021), encontraram um valor de tração perpendicular de 0,61 MPa na amostra testemunha. Enquanto Kumar *et al.* (2013) obtiveram valores entre 0,54 e 0,61 MPa ao adicionar carvão ativado à resina UF. Para painéis aglomerados de três camadas com densidade de 780 kg/m^3 , Gumus *et al.* (2024), obtiveram média de 0,68 MPa para o tratamento testemunha.

Para os efeitos da adição de endurecedores à base de amônio e alumínio à resina UF nas propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados, Ghani *et al.* (2019) encontraram valores entre 0,87 e 1,4 MPa. Valores inferiores foram encontrados por Atar *et al.* (2014), que avaliaram diferentes tipos de endurecedores na UF, obtendo valores entre 0,23 e 0,56 MPa.

O desempenho da ligação interna em painéis reconstituídos de madeira é influenciado pela composição do adesivo, que interage com a madeira em ambas as faces da linha de cola. Portanto, as tensões geradas no sistema madeira-linha de cola é um fator determinante no desempenho do material colado (Albuquerque *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2024; Lima *et al.*, 2020).

5.5.3 Dureza Janka

A análise de regressão linear dos ensaios de dureza Janka demonstrou que a incorporação de lã de vidro ao adesivo UF impactou significativamente o desempenho dos painéis ($p < 0,05$) (Apêndice C4). Observou-se uma tendência linear crescente entre o teor de lã de vidro e a resistência à abrasão (Figura 17)

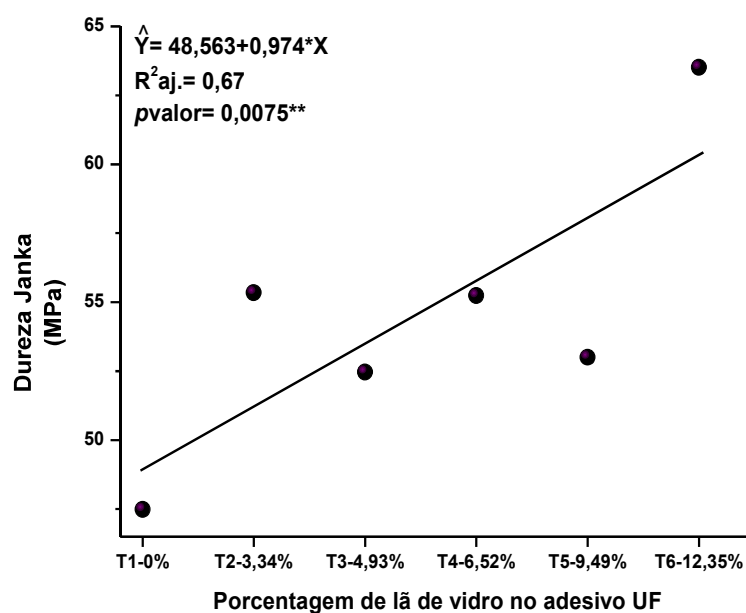


Figura 17. Regressão linear entre dureza Janka dos painéis aglomerados em função da porcentagem de lã de vidro adicionada ao adesivo ureia-formaldeído (UF). **: significativo a 1% de probabilidade; \hat{Y} : dureza Janka estimada; X: porcentagem de lã de vidro adicionada ao adesivo ureia-formaldeído (%); $R^2_{aj.}$: R-quadrado ajustado; p valor: probabilidade associada ao teste Janka.

De acordo com a ANSI A208.1 (1999), que estabelece um requisito mínimo de 22,7 MPa, todos os painéis atenderam às especificações normativas. Esses resultados indicam que a modificação na formulação adesiva influenciou diretamente a dureza dos painéis, reforçando a relação entre a composição do adesivo e o desempenho mecânico do material.

A dureza Janka depende da pressão e temperatura aplicadas no processo de produção, bem como pelo teor de umidade do material e densidade do painel, que, por sua vez, está diretamente relacionada à taxa de compactação (Battistelle *et al.*, 2016; Büyüksari, 2013; Taquetti *et al.*, 2023; Ulker, 2018).

Como os painéis deste estudo foram produzidos sob condições uniformes e com densidades semelhantes, esperava-se que os valores de dureza não apresentassem variações expressivas. No entanto, o adesivo com maior teor de lã de vidro proporcionou ao painel aglomerado um desempenho 33,8% superior, quando comparado com os painéis testemunha.

O tempo de condicionamento é um fator que influencia a dureza, favorecendo a polimerização da resina UF e a transferência de calor (Atar *et al.*, 2014; Taghiyari *et al.*, 2022). Por sua vez, Srivabut *et al.* (2018) destacam que a dispersão homogênea

das cargas e a redução de vazios na matriz, aliadas ao fortalecimento das interações entre as cargas e a matriz, são determinantes para alcançar melhores resultados de desempenho estrutural.

Houve uma tendência de redução nos valores de dureza Janka ao incorporar partículas de borracha de pneu em painéis de *Pinus taeda* (Macedo *et al.*, 2015). Por outro lado, a adição de resíduos de erva-mate e fibras de coco, não alterou significativamente essa propriedade em painéis de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Schyzolobium amazonicum*, respectivamente (Carvalho *et al.*, 2015; Colli *et al.*, 2010). Esses achados reforçam a influência do tipo de material utilizado na produção dos painéis reconstituídos.

Em outra vertente, Haselein *et al.* (2002) demonstraram que a geometria das partículas não influenciou a dureza Janka de painéis aglomerados com densidade de 700 kg/m³. Bianche *et al.* (2012) sugeriram que o uso de partículas com maior área superficial, como as de *Sida* spp. contribui para uma melhor resistência superficial dos painéis, aumentando os valores de dureza Janka.

Por fim, Lei *et al.* (2008) relataram que a adição de pequenas quantidades de montmorilonita sódica, um tipo de argila, foi capaz de acelerar o processo de cura da resina UF, resultando em um aumento na dureza de painéis aglomerados e compensados. Esse efeito pode ser atribuído à capacidade dessas partículas de promover uma taxa mais controlada de reticulação, contribuindo para um endurecimento mais uniforme e consistente da matriz resinosa.

5.5.4 Resistência ao arrancamento de parafuso

A análise de variância (ANOVA) indicou uma influência significativa dos teores de lã de vidro incorporados ao adesivo sobre as propriedades de resistência ao arrancamento de parafuso ($F, p < 0,01$) (Apêndice C5). O teste de Scott-Knott, realizado a 5% de significância formou dois grupos distintos: T2 e T6 no grupo “a”, apresentando os melhores resultados, enquanto os tratamentos T1, T3, T4 e T5 foram classificados no grupo “b” (Figura 18). Todos os tratamentos atenderam ao limite mínimo exigido pela NBR 15316-2 (ABNT, 2006).

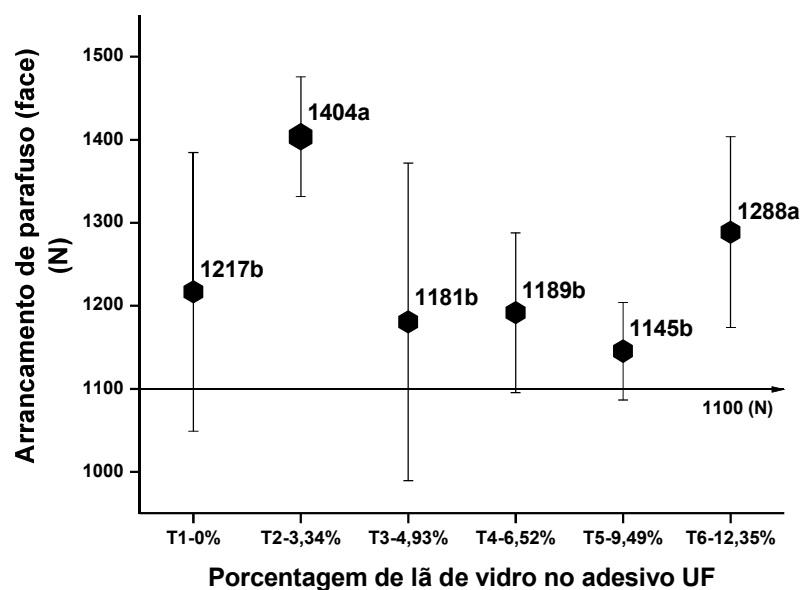


Figura 18. Valores médios de resistência ao arrancamento de parafuso na superfície (N) de painéis aglomerados em função da porcentagem de lã de vidro adicionada ao adesivo ureia-formaldeído (UF). Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente (Skott-Knott, $p > 0,05$).

Os valores obtidos nesta pesquisa estão compatíveis com aqueles relatados por Iwakiri *et al.* (2012a) que obtiveram resultados médios de resistência ao arrancamento de parafuso na superfície de painéis aglomerados produzidos com diferentes espécies de madeira, como *Acrocarpus fraxinifolius* (1.503 MPa), *Grevilea robusta* (920 MPa), *Schizolobium parahyba* (1.244 MPa) e *Toona ciliata* (1.705 MPa).

Os fatores que influenciam a resistência ao arrancamento de parafusos incluem a qualidade da ligação entre partículas e adesivo, bem como características físicas e mecânicas do painel. Bazzetto *et al.* (2019) destacaram que resultados insatisfatórios podem estar relacionados ao conteúdo insuficiente de adesivo e à baixa taxa de compactação, enquanto Tinti (2015) associou a baixa resistência à dimensão inadequada das partículas e à presença de casca, que prejudicam a adesão e formam ligações frágeis no painel.

Além disso, Chaydarreh *et al.* (2022) apontaram uma correlação positiva entre a resistência ao arrancamento de parafusos e a resistência interna, indicando que valores elevados desta propriedade podem refletir em uma ligação eficiente entre as partículas, contribuindo para um desempenho superior dos painéis.

A densidade dos painéis é amplamente reconhecida como um fator determinante na resistência ao arrancamento de parafusos, sendo observada uma relação quase linear entre o aumento da densidade e a melhoria dessa propriedade (Alma *et al.*, 2005; Cai *et al.*, 2004; Martins *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2007). Painéis com maior densidade na superfície demonstram melhor desempenho em comparação àqueles com densidade homogênea, causado pela influência da densidade na camada superficial de cada face (Leng; Hunt; Tajvidi, 2017).

Contudo, fatores como a presença de espaços vazios e dificuldades de adesão, especialmente com materiais particulados não homogêneos, podem comprometer essa relação, como evidenciado por Taquetti *et al.* (2023). Pesquisas com a adição de nanoargila em compósitos lignocelulósicos produzidos com fenol formaldeído não promoveu melhorias significativas na resistência ao arrancamento de parafusos (Candan; Akbulut, 2013; Rafighi; Dorostkar; Madhoush, 2014; Salari *et al.*, 2013). Essa limitação foi atribuída à fraca adesão interfacial entre as matrizes poliméricas e a biomassa lignocelulósica (Gillela *et al.*, 2024).

Destacados avanços na resistência ao arrancamento de parafuso em painéis de madeira, são citadas por Bansal *et al.* (2024) ao compilar diversas pesquisas sobre o tema. Entre os exemplos apresentados, o uso de fibras de nanocelulose (CNF) aumentou a resistência à retirada de pregos e parafusos (Leng *et al.*, 2017). Esse trabalho evidencia o impacto positivo de nanomateriais na otimização das propriedades mecânicas de painéis lignocelulósicos.

5.6 Inflamabilidade dos painéis aglomerados

As médias dos tratamentos avaliados no teste de inflamabilidade estão apresentadas na Figura 19. A análise de variância (ANOVA) revelou diferenças significativas entre os tratamentos testados (F , $p < 0,01$) (Apêndice D). Quando agrupados pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância, os tratamentos foram separados em dois grupos estatisticamente distintos, evidenciando diferenças significativas no desempenho.

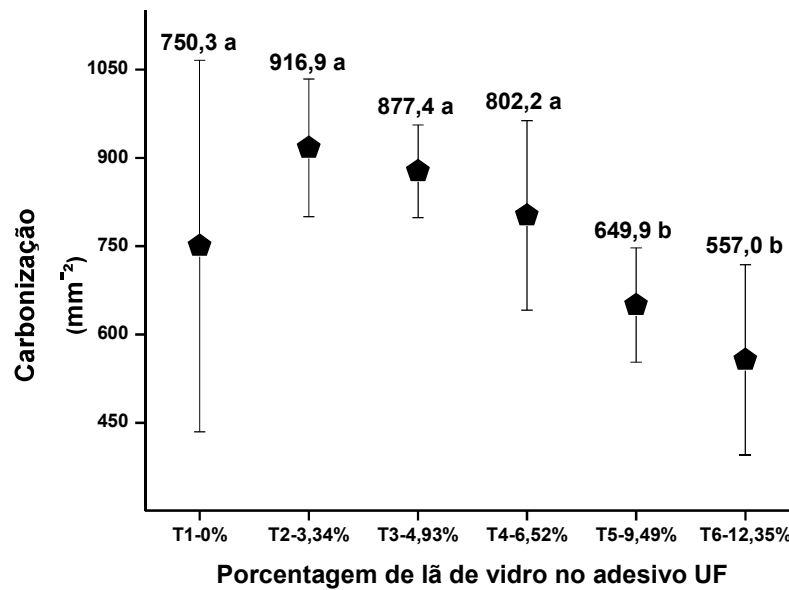


Figura 19. Valores médios do ensaio de inflamabilidade em painéis aglomerados para a área de carbonização (mm²), em função da porcentagem de lã de vidro adicionada ao adesivo ureia-formaldeído (UF). Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente (Skott-Knott, $p > 0,05$).

Os tratamentos T1, T2, T3 e T4 compuseram o grupo com desempenhos inferiores, enquanto para aqueles com 9,49 e 12,35% de lã de vidro, observou-se um desempenho significativamente superior, com as menores áreas queimadas, 649,9 mm² e 557,0 mm², respectivamente. Esse limiar mínimo de enchimento, capaz de melhorar a resistência do painel aglomerado pode estar relacionado à distribuição mais uniforme das fibras de lã de vidro na matriz do painel, proporcionando maior proteção e resistência à propagação do fogo.

O alto teor de sílica nos resíduos de lã de vidro, amplamente reconhecido por sua capacidade de retardar a propagação do fogo (Evangelista, 2011; Lee; Thole, 2018; Lemougna *et al.*, 2020; Machado, 2018; Seekamp, 1954), foi evidenciado neste estudo. Esse comportamento pode ser explicado pela natureza inorgânica e não combustível da lã de vidro, que pode atuar como uma barreira, retardando a propagação do fogo e reduzindo a combustão das partículas de madeira. Além disso, os resultados corroboram a relação entre a dureza Janka e a inflamabilidade dos materiais (Albert; Liew, 2024; Harada; *et al.*, 2006; Najahi *et al.*, 2023).

Os resultados deste estudo apresentam um desempenho promissor, alinhando-se às evidências da literatura. Painéis de partículas com palha de arroz sem ligante

apresentaram boa reação ao fogo (Ferrandez-Garcia *et al.*, 2017). Já Lopez *et al.* (2022) demonstraram que compósitos plásticos de madeira produzidos por extrusão exibiram propriedades auto extingüíveis, enquanto aqueles obtidos por compressão ou injeção apresentaram ignição e carbonização após tempos curtos de exposição à chama. Por outro lado, painéis à base de resíduos agrícolas ligados com adesivos de caseína mostraram propriedades retardantes de chama superiores (Mahieu *et al.*, 2021).

Um marco recente no campo da melhoria da resistência ao fogo em materiais à base de madeira é o trabalho de Albert e Liew (2024), que oferece uma revisão abrangente dos avanços alcançados na última década. O estudo aborda fatores críticos no desempenho de reação ao fogo e analisa tratamentos como nanopartículas, grafeno, revestimentos biológicos e densificação. Os autores também enfatizam a necessidade de maior investigação em áreas como durabilidade, compatibilidade química e adesão dos materiais retardadores.

Esse trabalho contextualiza os resultados do presente estudo ao oferecer um panorama das estratégias e potencialidades da pesquisa científica em soluções inovadoras, evidenciando seu papel na melhoria da segurança contra incêndios e na mitigação de riscos.

5.7 Propriedades acústicas dos painéis aglomerados

5.7.1 Isolamento de impacto acústico (IIS)

A análise estatística dos resultados obtidos para a avaliação do isolamento acústico nos painéis aglomerados com um decibelímetro revelou diferenças significativas entre os tratamentos testados (F , $p < 0,05$) (Figura 20).

Adicionalmente, o teste de normalidade de Shapiro-Wilk confirmou a adequação dos dados ao pressuposto de normalidade ($W = 0,96954$; $p = 0,07795$) reforçando a robustez dos resultados (Apêndice E1).

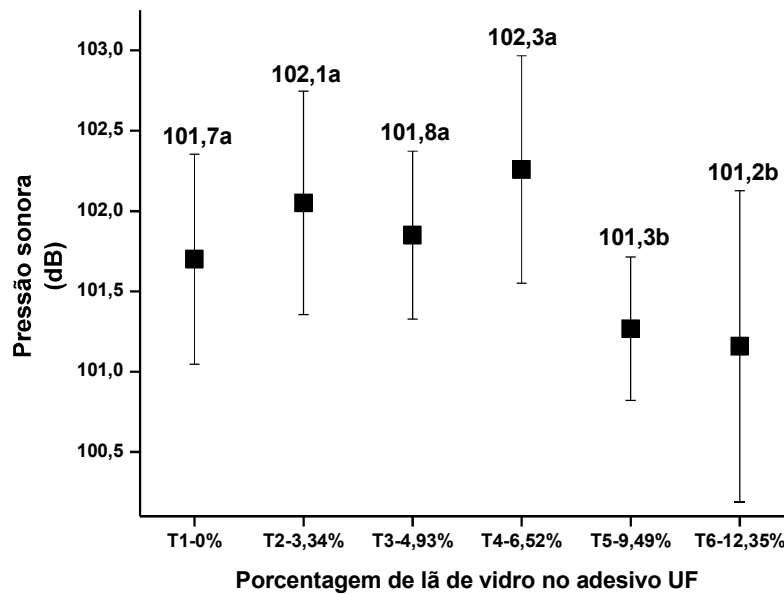


Figura 20. Valores médios do teste de isolamento acústico por impacto (dB) nos painéis aglomerados em função da porcentagem de lã de vidro adicionada ao adesivo ureia-formaldeído (UF). Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente (Skott-Knott, $p > 0,05$).

Esses indicadores estatísticos, aliados ao controle rigoroso das variáveis experimentais, como a potência do impacto sonoro e o posicionamento das amostras, destacam a obtenção de dados reprodutíveis e confiáveis. No entanto, para validar a eficiência de metodologias propostas, são necessários novos ensaios, ajustes e correlações com diferentes materiais.

Para os tratamentos com maiores porcentagens de lã de vidro (9,49 e 12,35%), nota-se menores médias de decibéis, indicando um desempenho superior no isolamento acústico. Já os tratamentos com 0, 3,34, 4,93 e 6,52% de resíduos de lã de vidro não apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Essa similaridade pode ser justificada pela baixa concentração de resíduo de lã de vidro, que pode não ter sido suficiente para alterar de forma relevante as propriedades acústicas do painel em comparação ao tratamento sem adição de resíduo.

Neste cenário, a influência do resíduo de lã de vidro sobre o isolamento acústico é mais evidente apenas em concentrações mais elevadas. Ainda assim, o uso de resíduo de lã de vidro na formulação do adesivo demonstrou ser uma estratégia eficaz para melhorar as propriedades acústicas do painel aglomerado de média densidade.

5.7.2 Decremento logarítmico de amortecimento acústico (*DI*) e eficiência de conversão acústica (*ECA*).

O aparato experimental empregado foi suficiente para caracterizar módulos elásticos e amortecimento nos aglomerados. Os resultados obtidos detalham as propriedades acústicas para os diferentes tratamentos dos painéis (Tabela 10), como decremento logarítmico de amortecimento acústico (*DI*) e eficiência de conversão acústica (*ECA*) (Apêndice E2 e E3, respectivamente). Também são apresentadas as médias da densidade (ρ) de corpos de prova quadrado (40 × 40 cm) com seus respectivos módulos de elasticidade dinâmico (E_{din}).

Tabela 10. Densidade média, módulo elástico dinâmico, decremento logarítmico de amortecimento acústico e eficiência de conversão acústica em painéis aglomerados em função da porcentagem de lã de vidro adicionada ao adesivo ureia-formaldeído (UF)

Tratamento	ρ (kg/m ³)	E_{din} (MPa)	DI (m ⁻⁴ ·kg ⁻¹ ·s ⁻¹)	ECA (m ⁻⁴ ·kg ⁻¹ ·s ⁻¹)
T1-0%	693,8 a	4301,1 c	0,0877 a	154,34 b
T2-3,34%	704,4 a	4746,7 a	0,0835 c	165,35 a
T3-4,93%	707,9 a	4491,1 b	0,0859 b	154,85 b
T4-6,52%	704,9 a	4488,9 b	0,0859 b	156,10 b
T5-9,49%	702,3 a	4302,2 c	0,0871 a	151,70 b
T6-12,35%	699,1 a	4251,1 c	0,0882 a	150,25 b

ρ : densidade gravimétrica do painel aglomerado; E_{din} : Módulo elástico dinâmico obtido em vibração flexional na frequência transversal; DI : decremento logarítmico de amortecimento; ECA : eficiência de conversão acústica. Letras iguais na coluna não apresentam diferença significativa (Skott-Knott, $p > 0,05$).

A análise estatística revelou que não houve diferença significativa na densidade (ρ) do produto final (corpos de prova de dimensões maiores) entre os diferentes tratamentos. Esse resultado demonstra que as diferenças nas propriedades acústicas observadas podem ser atribuídas a outros fatores como a distribuição interna das partículas, a matriz adesiva e a porosidade dos painéis.

Vale ressaltar que a literatura carece de estudos abrangentes sobre fator de amortecimento em painéis aglomerados, especialmente com este tipo de geometria. No entanto, a compactação, porosidade e desempenho de ligação interna em painéis, são fatores que interferem o percurso das ondas sonoras. As frequências

naturais de vibração do corpo são proporcionais aos módulos elásticos, esperando-se assim que ocorram menores taxas de amortecimento em materiais mais densos e rígidos (Ahmed; Adamopoulos, 2018; Arunkumar *et al.*, 2016; Carrasco *et al.*, 2017; Taghiyari; Taheri; Omrani, 2017).

O módulo de elasticidade dinâmico variou significativamente entre os tratamentos, sendo o maior valor observado no tratamento T2, e os menores nos tratamentos T1, T5 e T6, que não diferenciaram estatisticamente. Isso evidencia que o tratamento com 3,34% de lã de vidro na composição do adesivo resultou em maior rigidez dinâmica e menor amortecimento do painel, reforçando a relação inversa entre esses parâmetros.

A menor taxa de amortecimento é evidenciada no tratamento T2, conferindo uma redução de 4,79% em relação ao tratamento sem enchimento. A testemunha não diferenciou estatisticamente dos tratamentos T5 e T6, indicando que o aumento nos teores de lã de vidro ao adesivo não resultou em alterações no padrão de amortecimento do material. A estrutura do material aglomerado justifica maiores valores do decremento logarítmico de amortecimento acústico, quando comparados com a madeira e outros materiais descritos na literatura (Carrasco *et al.*, 2017; Laudares *et al.*, 2023; Roitman, 2021; Zatloukal *et al.*, 2024).

O índice de eficiência de conversão acústica (*ECA*) apresentou diferença estatística apenas no tratamento T2, destacando-se com o maior valor ($165,35 \text{ m}^{-4} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), valor 7% superior quando comparado à testemunha. Esse valor reflete na maior eficiência do painel em converter energia vibracional em energia acústica. Por outro lado, os demais tratamentos, incluindo a testemunha, não diferiram estatisticamente entre si, sugerindo que o incremento de lã de vidro no adesivo, exceto no tratamento T2, não impactou de forma significativa a eficiência de conversão acústica dos painéis.

5.8. Caracterização química dos painéis aglomerados

Para a composição do resíduo de lã de vidro por meio da espectroscopia do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) (Figura 21), nota-se a presença de uma banda de absorção em torno de 1636 cm^{-1} , que pode estar atribuída a

ligeiras lixiviações que ocorrem na superfície das fibrilas que constitui a matéria-prima (Larena; Urreaga; Orden, 1991). A banda de absorção de 1441 cm^{-1} identificada está geralmente associada à vibração de deformação de grupos orgânicos, como C-H, que podem estar presentes em aditivos aplicados no processamento da lã de vidro (Larena *et al.*, 1991).

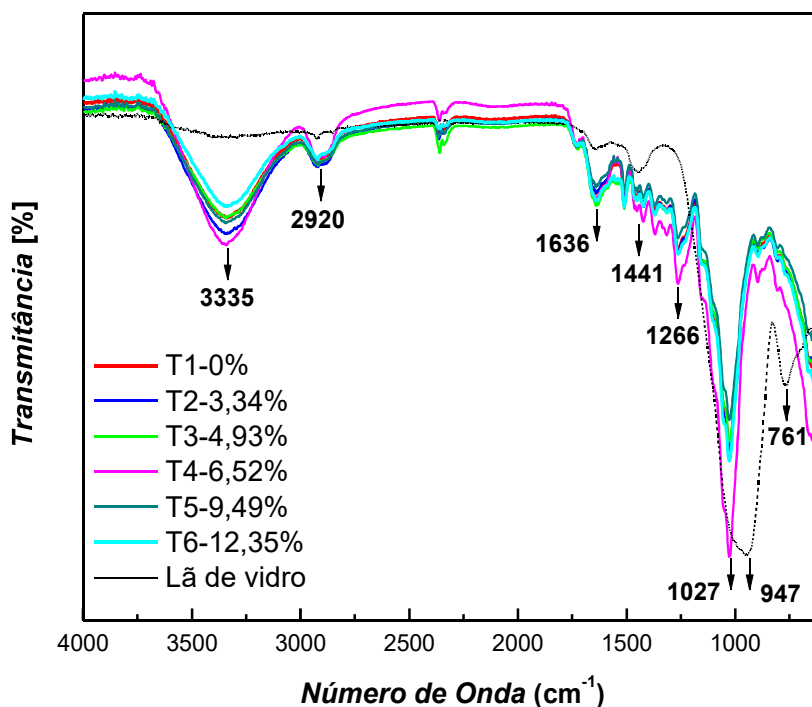


Figura 21. Espectros de FTIR presentes no resíduo de lã de vidro e nos painéis aglomerados com diferentes proporções de enchimento no adesivo ureia-formaldeído (UF).

O forte pico observado em 947 cm^{-1} é atribuído às vibrações de estiramento de Si-O, que são grupos silanóis (Si-OH) característicos de materiais constituídos de redes de silicato (Piccolo, 2022). A banda identificada em 765 cm^{-1} corresponde a bandas mais curtas de vibrações de flexão de Si-O-Si, que são ligações presentes na estrutura da rede de vidros (Arias; Thielemans, 2022).

Esse comportamento espectral reforça o caráter amorfo do material e a presença predominante de ligações Si-O justifica a resistência térmica e estabilidade química evidenciadas na análise de termogravimetria (Figura 11).

O espectro observado nos painéis aglomerados apresentou bandas intensas, com transmitância de radiação em 3340 cm^{-1} , atribuídos às ligações de hidrogênio O-H e N-H (Roumeli *et al.*, 2012). Sinais em 2925 e 2850 cm^{-1} estão relacionados a

vibrações de ligações C-H na celulose e lignina. Já a redução da intensidade observada na banda em 1027 cm^{-1} , associado à celulose, reforça a interferência de cargas no estiramento de C-N ou N-C-N das ligações de metileno (Hellmeister, 2017; Santos, 2024).

Segundo Roumeli *et al.* (2012) bandas entre 1200 e 1600 cm^{-1} são características de vibrações de ligação na molécula de lignina. Já bandas em número de ondas em 1580 cm^{-1} evidenciam ao estiramento angular da água nas estruturas da celulose (Haafiz *et al.*, 2014). A transmitância máxima da radiação, nessa região espectral, apresenta variações associadas ao grau de cristalinidade da celulose. (Nelson; O'Connor, 1964). Grupos funcionais das polioses, especialmente as glucomanas, comuns em coníferas, são absorvidas na região próximo a 900 cm^{-1} (Åkerholm, 2003).

5.9. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Figura 22a, obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em 200x, evidencia a interação microestrutural entre o adesivo ureia-formaldeído modificado (T6-12% de lã de vidro) e as fibras de lã de vidro. Observa-se um fenômeno de *pull-out* de elementos de lã de vidro, evidenciando a adesão interfacial, caracterizada pelo rompimento parcial das fibrilas na matriz adesiva.

Em maior ampliação (Figura 22a1, 270x, destacada em vermelho), evidencia uma linha de fratura, observa-se uma região onde a matriz não envolveu completamente uma fibrila de vidro, indicando falhas na ancoragem mecânica em nível de compatibilidade interfacial entre os componentes. Esse comportamento pode facilitar o deslizamento das fibrilas dentro da matriz, promovendo a redistribuição do reforço e o preenchimento de vazios na estrutura do aglomerado.

Durante o processo de fabricação do aglomerado, a redução da viscosidade da resina sob o aumento inicial de temperatura e pressão pode acentuar esse efeito. No entanto, o excesso de lã de vidro interfere nessa fluidez, podendo acelerar a solidificação do adesivo e comprometer a uniformidade das interfaces adesivas.

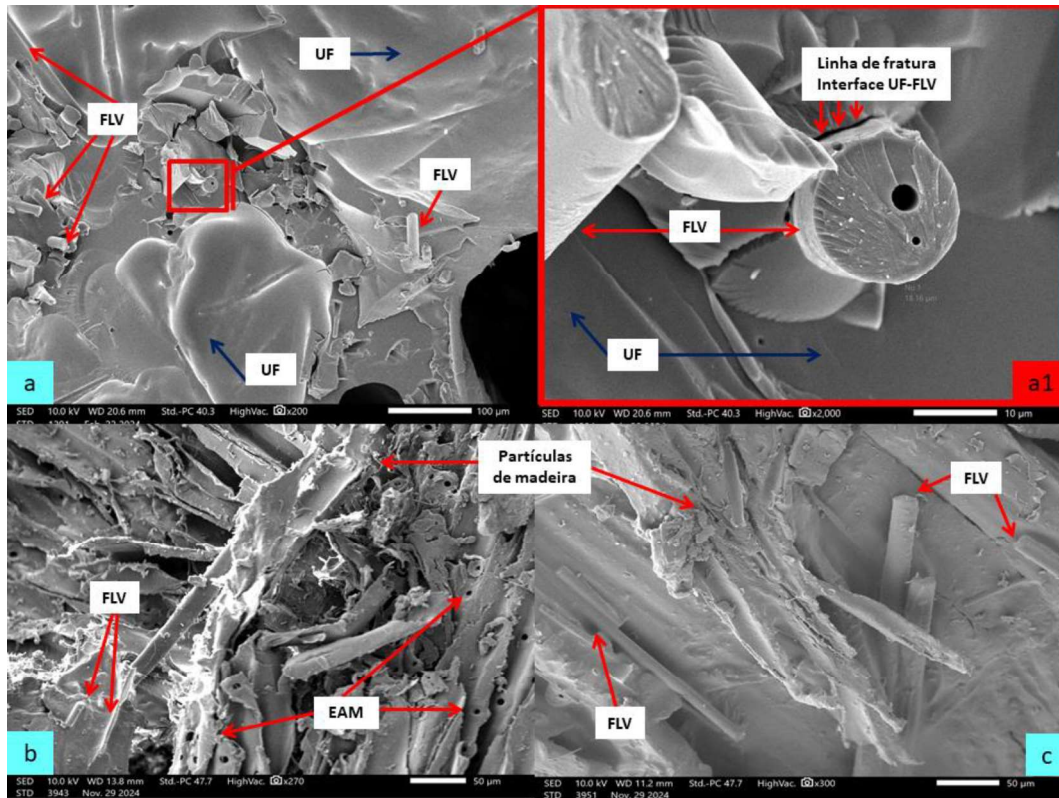


Figura 22. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV). (a): resina ureia-formaldeído (UF) com filamentos de lã de vidro (FLV); (b) e (c): painel aglomerado de madeira reconstituída produzida com UF modificada com lã de vidro como material de enchimento; EAM: elementos anatômicos da madeira.

As Figuras (22b;c) apresentam a microestrutura do aglomerado de madeira produzido com adesivo ureia-formaldeído modificado com o maior teor de enchimento. Observa-se a dispersão das microfibrilas de vidro ao longo da matriz do aglomerado, onde a resina UF atua como elemento ligante, envolvendo e ancorando tanto as partículas de madeira quanto os elementos da lã de vidro.

Com o acréscimo do enchimento avaliado e maior área superficial demandada, espera-se mobilidade, fluidez, ancoragens e umectação reduzidas, causando falhas na distribuição dos elementos e nas interações interfaciais. A interação entre os componentes sugere que a presença das microfibrilas pode influenciar a microestrutura dos painéis aglomerados, afetando propriedades do produto final.

5.10 Análises estatísticas multivariadas

5.10.1 Análises de Cluster

No dendrograma de Cluster (Figura 23), foi possível agrupar os tratamentos, sendo formados quatro grupos distintos. Os grupos 1, 2 e 3, compostos por apenas um tratamento cada, corresponderam, respectivamente, aos tratamentos T2, T6 e T5. Já o grupo 4 foi composto pelos tratamentos T4, T1 e T3.

A análise hierárquica de agrupamento revela o tratamento T2 segregado dos demais em um nível hierárquico superior, evidenciando seu desempenho otimizado como painel aglomerado. Em contrapartida, o tratamento T6, com 12,35% de lã de vidro, formou um ramo distinto, refletindo maior dissimilaridade em relação aos demais tratamentos devido à variabilidade no desempenho das propriedades avaliadas.

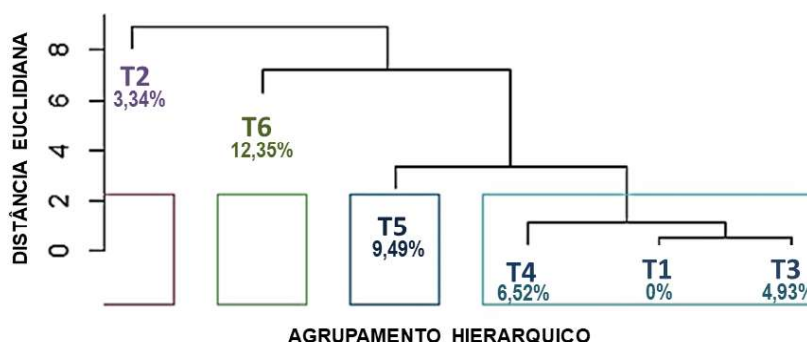


Figura 23. Dendrograma da análise hierárquica de Cluster dos tratamentos aplicados em função da porcentagem de lã de vidro adicionada ao adesivo ureia-formaldeído (UF).

5.10.2 Análise de componentes principais (ACP)

A ACP evidencia as correlações entre as variáveis mais influentes nos componentes principais 1 e 2, que explicam 80,3% da variabilidade total dos dados, com maior contribuição do componente principal 1 (59%). Os tratamentos são representados por pontos coloridos, de acordo com suas respectivas porcentagens de lã de vidro no adesivo (Figura 24).

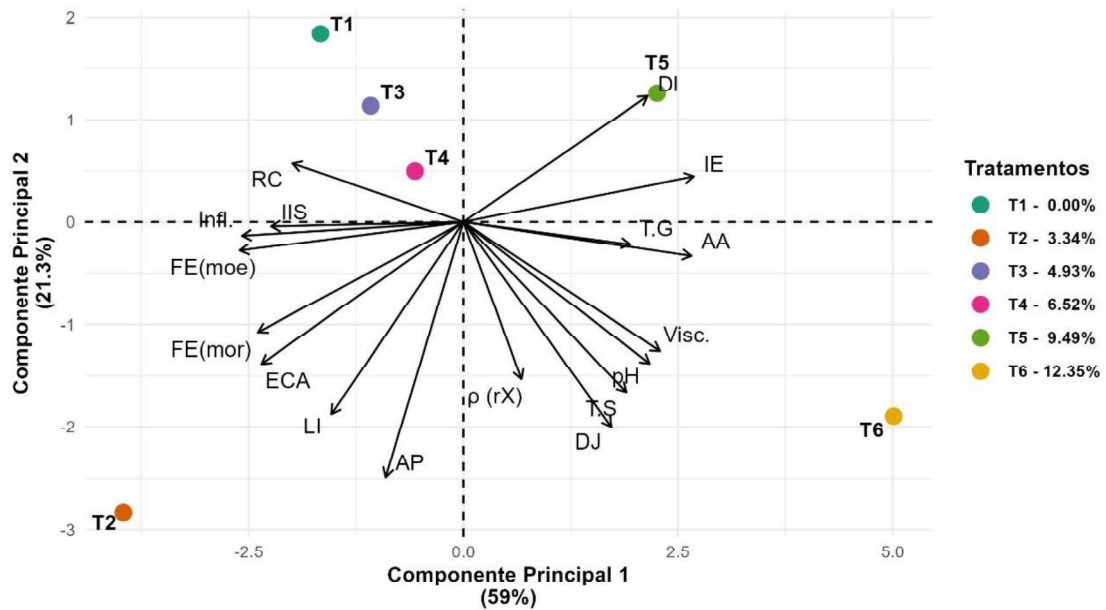


Figura 24. Análise de componentes principais (ACP) das propriedades dos painéis aglomerados. T: Tratamento em função da porcentagem de lã de vidro adicionado ao adesivo ureia-formaldeído; T.G: tempo de gel; Visc.: viscosidade; T.S: teor de sólidos; $\rho(rX)$: densidade aparente; RC: razão de compactação; AA: absorção de água; IE: inchamento em espessura; $FE_{(moe)}$: Módulo elástico na flexão estática; $FE_{(mor)}$: módulo de ruptura na flexão estática; LI: ligação interna; DJ: dureza Janka; AP: arrancamento de parafuso (face); Infl.: inflamabilidade; DI: decremento logarítmico de amortecimento acústico; ECA: eficiência de conversão acústica; IIS: isolamento de impacto sonoro.

No componente principal 1, as variáveis de maior relevância foram inchamento em espessura (IE), absorção de água (AA), inflamabilidade (Infl.), eficiência de conversão acústica (ECA), flexão estática (FE_{moe}) e (FE_{mor}), isolamento de impacto sonoro (IIS), viscosidade (Visc.), decremento logarítmico de amortecimento acústico (DI), pH, tempo de gel (TG) e teor de sólidos (TS). Já no componente principal 2, as variáveis densidade ($\rho.rX$), razão de compactação (RC), arrancamento de parafuso (AP), dureza Janka (DJ) e ligação interna (LI) são de maior relevância para a explicação dos dados.

O posicionamento do tratamento T2 no *biplot* da ACP indica sua forte correlação com variáveis-chave que definem a qualidade estrutural e funcional dos painéis, como módulo de elasticidade, densidade, ligação interna e arrancamento de parafusos.

Além disso, a distribuição do tratamento T2 dentro do espaço dos componentes principais evidencia seu equilíbrio entre propriedades mecânicas e estabilidade dimensional. Por outro lado, o tratamento T6 apresentou comportamento distinto,

evidenciando a influência das propriedades tecnológicas dos adesivos modificados com lã de vidro na performance do aglomerado, em especial a viscosidade e tempo de gel. Portanto, é preciso considerar com atenção os conceitos de propriedades reológicas, mecanismo, velocidade, grau e intensidade da solidificação do adesivo diante das formulações avaliadas.

5.10.3 Correlação de Pearson

A análise da correlação de Pearson permitiu avaliar a relação linear entre as variáveis investigadas, possibilitando uma interpretação quantitativa da intensidade dessas associações (Quadro 1).

	pH	T.S	Visc.	T.G	ρ (rX)	RC	AA	IE	FE _(moe)	FE _(mor)	LI	DJ	AP	Infl.	IIS	DI	ECA
pH	1																
T.S	0,95**	1															
Visc.	0,79 ^{ns}	0,74 ^{ns}	1														
T.G	0,42 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,80 ^{ns}	1													
ρ (rX)	0,24 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,41 ^{ns}	1												
RC	-0,88*	-0,74 ^{ns}	-0,55 ^{ns}	-0,35 ^{ns}	0,08 ^{ns}	1											
AA	0,88*	0,82*	0,77 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,87*	1										
IE	0,73 ^{ns}	0,64 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,09 ^{ns}	-0,79 ^{ns}	0,95**	1									
FE_(moe)	-0,71 ^{ns}	-0,57 ^{ns}	-0,79 ^{ns}	-0,73 ^{ns}	0,005 ^{ns}	-0,74 ^{ns}	-0,86*	-0,92**	1								
FE_(mor)	-0,43 ^{ns}	-0,36 ^{ns}	-0,59 ^{ns}	-0,57 ^{ns}	0,002 ^{ns}	0,49 ^{ns}	-0,75 ^{ns}	-0,91*	0,88*	1							
LI	-0,22 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	0,27 ^{ns}	-0,60 ^{ns}	-0,55 ^{ns}	-0,69 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,62 ^{ns}	1						
DJ	0,92*	0,89*	0,86*	0,48 ^{ns}	0,33 ^{ns}	-0,66 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,49 ^{ns}	-0,59 ^{ns}	-0,26 ^{ns}	0,15 ^{ns}	1					
AP	0,09 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,19 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	0,60 ^{ns}	0,33 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	-0,49 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,59 ^{ns}	0,88*	0,39 ^{ns}	1				
Infl.	-0,62 ^{ns}	-0,61 ^{ns}	-0,75 ^{ns}	-0,61 ^{ns}	-0,4 ^{ns}	-0,55 ^{ns}	-0,88*	-0,92*	0,82*	0,89*	0,49 ^{ns}	-0,46 ^{ns}	0,27 ^{ns}	1			
IIS	-0,50 ^{ns}	-0,42 ^{ns}	-0,65 ^{ns}	-0,71 ^{ns}	-0,63 ^{ns}	0,48 ^{ns}	-0,76 ^{ns}	-0,75 ^{ns}	0,62 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,51 ^{ns}	-0,34 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,86*	1		
DI	0,23 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,66 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,61 ^{ns}	0,78 ^{ns}	-0,77 ^{ns}	-0,95**	-0,55 ^{ns}	0,09 ^{ns}	-0,53 ^{ns}	-0,86*	-0,73 ^{ns}	1	
ECA	-0,37 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	-0,53 ^{ns}	-0,66 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,53 ^{ns}	-0,72 ^{ns}	-0,88*	0,87*	0,95*	0,75 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,82*	0,71 ^{ns}	-0,94**	1
Legenda	Correlação Fraca (0 > r ≤ 0,3)			Correlação Moderada (0,3 > r ≤ 0,6)			Correlação Forte (0,6 > r ≤ 0,9)			Correlação Muito forte (0,9 > r < 1)							

Quadro 1. Valores observados para a correlação de Pearson. **: correlações significativas a 1%; *: correlações significativas a 5%; ns: correlação não significativa ($p > 0,05$); r : coeficiente de correlação de Pearson; ρ (rX): densidade aparente; RC: razão de compactação; AA: absorção de água; IE: inchamento em espessura; AP: arrancamento de parafuso (face); DJ: dureza Janka; FE_(moe): Módulo elástico na flexão estática; FE_(mor): módulo de ruptura na flexão estática; LI: ligação interna; T.S: teor de sólidos; Visc.: viscosidade; T.G: tempo de gel; Infl.: Inflamabilidade; IIS: isolamento de impacto sonoro; DI: decremento logarítmico de amortecimento acústico; ECA: eficiência de conversão acústica.

Os coeficientes obtidos indicam a presença de correlações estatisticamente significativas, refletindo a interdependência entre os parâmetros analisados. Para a interpretação dos coeficientes, adotou-se uma classificação na qual valores entre 0,60 e 0,90 indicam uma correlação forte, enquanto coeficientes superiores a 0,90 representam uma correlação muito forte (Callegari-Jacques, 2003).

No presente estudo, mais de 50% das correlações identificadas enquadram-se no intervalo de correlação forte e muito forte (representadas em laranja e verde, respectivamente) e 28,5% foram consideradas correlações moderadas. Esses resultados evidenciam a elevada interdependência entre os parâmetros investigados, reforçando a consistência dos dados e a relevância das associações estabelecidas.

A correlação positiva muito forte (92%) observada entre o pH e a dureza Janka, propondo maior resistência de acordo com a diminuição da acidez do adesivo, evidencia uma eficácia da cura e solidificação eficiente da resina com as partículas da madeira de *Pinus* spp., especialmente na fase de solidificação. Por outro lado, inflamabilidade e inchamento em espessura apresentou correlação negativa muito forte (-92%), evidenciando a complexa interação entre estabilidade estrutural e propriedades ignífugas.

A forte correlação entre a resistência à flexão no módulo de ruptura (FE_{mor}) com o amortecimento e a eficiência de conversão acústica, ambos com correlação acima de 95%, indica que o comportamento acústico é influenciado diretamente pelas propriedades mecânicas, especialmente na sua resistência. Além disso, o amortecimento e a eficiência de conversão acústica, obtidos nos ensaios não destrutivos, reforça a precisão do método com a câmara acústica experimental empregada.

6. CONCLUSÕES

O resíduo de lã de vidro como material de enchimento na resina ureia-formaldeído, de modo geral, afetou significativamente propriedades como pH, viscosidade, tempo de gel e o teor de sólidos do adesivo. Apesar disso, os painéis aglomerados apresentaram bom desempenho, superando os limites normativos estabelecidos.

O tratamento com 3,34% de enchimento se sobressaiu como a formulação mais eficiente, equilibrando estabilidade dimensional e propriedades mecânicas. Esses fatores indicam que essa proporção de filamentos de lã de vidro incorporadas no adesivo melhorou a adesão interfacial da matriz com a madeira, alterou a microestrutura do painel aglomerado e favoreceu desempenhos, especialmente mecânicos.

Concentrações elevadas de lã não interferiram na adesão interfacial e resistência de ruptura. Apesar das imagens de MEV corroborarem uma tendência de falhas estruturais na ancoragem das fibrilas de vidro à matriz adesiva, maiores teores de enchimento favoreceram a dureza do painel, melhoraram a resistência à combustão e alterou positivamente as propriedades acústicas dos aglomerados.

As análises estatísticas multivariadas permitiram uma compreensão mais aprofundada das interações entre as variáveis avaliadas, evidenciando os padrões de comportamento dos painéis em função das diferentes concentrações de lã de vidro. A identificação dessas relações possibilitou conhecer inferências acerca dos mecanismos que governam as propriedades físicas, mecânicas e acústicas dos compósitos.

Os resultados obtidos reforçam a viabilidade técnica da incorporação de resíduos de lã de vidro, demonstrando que ajustes na formulação adesiva podem otimizar o desempenho dos painéis. Essa abordagem não apenas promove o reaproveitamento de resíduos industriais, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade, como também contribui para o desenvolvimento de novos materiais com potencial de aplicação no setor de painéis de madeira reconstituída.

RECOMENDAÇÕES

O projeto enfrentou limitações na homogeneização das cargas de lã de vidro na resina ureia-formaldeído, especialmente pela dificuldade de padronizar o tamanho do resíduo e o tempo de mistura, que resultaram em dispersão não uniforme das fibrilas. Variáveis como tempo de homogeneização e velocidade de agitação foram variáveis que interferiram nas propriedades tecnológicas do adesivo, em especial a viscosidade, que foi inviável na aplicação por pulverização por meio de pistola a ar, em tambor rotativo, método comumente utilizado em várias pesquisas. Para contornar essa limitação, a homogeneização foi realizada manualmente.

Para estudos futuros recomenda-se investigar a relação entre as condições de síntese das resinas e a viscosidade resultante, e aperfeiçoar os parâmetros de aplicação por aspersão. A adequação dos bicos das pistolas de pulverização, associada à análise controlada da incorporação de água no sistema, pode viabilizar o uso dessa técnica em formulações com maiores teores de enchimento, ampliando as possibilidades de aplicação industrial.

Com base no desenvolvimento da pesquisa e ao considerar os processos metodológicos adotados, assim como os resultados e conclusões obtidos, as seguintes recomendações são apresentadas:

- Analisar a viabilidade da incorporação do resíduo de lã de vidro em painéis de três camadas, para avaliar seu comportamento entre as camadas internas e superficiais.
- Incorporar uma fração de ureia líquida a base de água ao sistema, para reduzir a viscosidade.
- Explorar a pegada ambiental da utilização do resíduo de lã de vidro e estratégias para mitigar impactos ambientais com seu reaproveitamento em processos industriais.
- Correlacionar parâmetros produtivos, como pressão, temperatura e tempo de prensagem, por meio de planejamentos experimentais detalhados.
- Avaliar tratamentos físicos e químicos no resíduo de lã de vidro, para otimizar sua interação com a matriz adesiva e melhorar a adesão interfacial.

- Investigar o desempenho da lã de vidro como enchimento em diferentes adesivos e sua aplicabilidade na fabricação de outros painéis, como MDF, OSB e compensados.
- Analisar propriedades não contempladas neste estudo, como emissão de formaldeído, molhabilidade, rugosidade, intemperismo e resistência a organismos biológicos.
- Avaliar a influência das características físico-químicas da madeira em painéis com lã de vidro, considerando diferentes espécies e condições de crescimento.
- Analisar o impacto econômico da substituição parcial de cargas tradicionais por lã de vidro, e avaliar os custos de produção e desempenho técnico.
- Buscar uma alternativa eficiente de impregnar os resíduos de lã de vidro nas partículas de madeira antes do processo de aplicação do adesivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11941**: Madeira - Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro. 2003.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15316-2**: Chapas de fibras de média densidade. Parte 2: Requisitos. Rio de Janeiro. 2006.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14810-1**: Painéis de Partículas de média densidade. Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro. 2013.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14810-2**: Painéis de partículas de média densidade. Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro. 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7190-2**: Projeto de estruturas de madeira. Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. Rio de Janeiro. 2022.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14810-2**: Painéis de partícula de média densidade. Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro. 2024.
- ABTCP. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. **M11/77**: Teor de cinzas, São Paulo. 1974.
- ACHCHAQ, F.; DJELLAB, K.; BEJI, H. Hydric, morphological and thermo-physical characterization of glass wools: From macroscopic to microscopic approach. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 10, p. 3214–3219, 2009.
- ACOSTA, A. P. *et al.* Wood-polymer composites produced by in situ polymerization of styrene into juvenile and mature pine woods. **International Wood Products Journal**, v. 11, n. 4, p. 204–210, 2020.
- ADEDIRAN, A. *et al.* Recycling glass wool as a fluxing agent in the production of clay- and waste-based ceramics. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, p. 125673, 2021.

AGUIAR, A. V.; SOUSA, V. A.; SHIMIZU, J. Y. **Cultivo de Pínus**. 2. ed. versão eletrônica: Embrapa Florestas, 2014.

AHMED, S. A.; ADAMOPOULOS, S. Acoustic properties of modified wood under different humid conditions and their relevance for musical instruments. **Applied Acoustics**, v. 140, p. 92–99, 2018.

ÅKERHOLM, M. **Ultrastructural aspects of pulp fibers as studied by dynamic FT-IR spectroscopy**. 2003. 64f. Thesis (Doctorate in Technology) - Swedish University of Agricultural Sciences, Wood and Wood Fibre Postgraduate School, Stockholm, Sweden, 2003.

AKYÜZ, K. C. *et al.* Effects of acidity of the particles and amount of hardener on the physical and mechanical properties of particleboard composite bonded with urea formaldehyde. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 30, n. 3, p. 166–169, 2010.

ALBERT, C. M.; LIEW, K. C. Recent development and challenges in enhancing fire performance on wood and wood-based composites: A 10-year review from 2012 to 2021. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 9, n. 1, p. 27–42, 2024.

ALBIN A., R. Determinacion del pH en diversas especies de los renovales de la provincia de Valdivia. **Bosque**, v. 1, p. 3–5, 1975.

ALBUQUERQUE, C. E. C. *et al.* Adesão e Adesivo. In: IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R. (Eds.). **Painéis de Madeira Reconstituída**. 2. ed. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 2020. p. 10–36.

ALBUQUERQUE, C.; LATORRACA, J. Influência das características anatômicas da madeira na penetração e adesão de adesivos. **Floresta e Ambiente**, v. 7, n. 1, p. 158–166, 2000.

ALEXANDRE, B. C.; CASTRO, V. G. Painéis aglomerados de baixa densidade para isolamento térmico produzidos com resíduo de marcenaria. **Instituto Florestal**, v. 34, n. 1, p. 75–80, 2022.

ALMA, M. H. *et al.* Properties of cotton carpel-based particleboards. **Industrial Crops and Products**, v. 22, n. 2, p. 141–149, 2005.

ALMEIDA, A. I. G. **Desenvolvimento de resinas melamina-ureia-formaldeído flexíveis para a produção de painéis de aglomerado de cortiça**. 2016. 62f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, Portugal, 2016.

ALMEIDA, V. C. **Efeito da adição de carga e extensor nas propriedades do adesivo ureia-formaldeído e dos compensados de pinus e paricá**. 2009. 75f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

ALMUSAWI, A. *et al.* Proposal of manufacturing and characterization test of binderless hemp shive composite. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 115, p. 302–307, 2016.

ALTEMEMY, M. A. *et al.* Development and characterisation of thermal properties of hybrid composites from date palm fiber and glass wool reinforced unsaturated polyester. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 19, n. 4, p. 1401–1419, 2024.

ALTEYRAC, J.; CLOUTIER, A.; ZHANG, S. Y. Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in black spruce (*Picea mariana* Mill. B.S.P.) at different stand densities and sampling heights. **Wood Science and Technology**, v. 40, n. 2, p. 124–138, 2006.

AMINI, M. H. M. *et al.* Citric acid-modified starch as an environmentally friendly binder for wood composite making. **BioResources**, v. 15, n. 2, p. 4234–4248, 2020.

ANGELINI, S. *et al.* Lignosulfonates as fire retardants in wood flour-based particleboards. **International Journal of Polymer Science**, v. 2019, p. 6178163, 2019.

ANOSIKE-FRANCIS, E. N. *et al.* Physical-Mechanical properties of wood based composite reinforced with recycled polypropylene and cowpea (*Vigna unguiculata* Walp.) husk. **Cleaner Materials**, v. 5, p. 100101, 2022.

ANSI. American National Standard Particleboard. **A208.1**: Particleboard. Gaithersburg, Maryland. 1999.

ARABI, M.; FAEZIPOUR, M.; GHOLIZADEH, H. Reducing resin content and board density without adversely affecting the mechanical properties of particleboard through controlling particle size. **Journal of Forestry Research**, v. 22, n. 4, p. 659–664, 2011.

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

ARAUJO, C. K. D. C. **Substituição parcial do adesivo fenol formaldeído por lignina kraft na produção de compensado**. 2024. 93f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista – UNESP, Guaratinguetá, 2024.

ARIAS, A. *et al.* Recent developments in bio-based adhesives from renewable natural resources. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, p. 127892, 2021.

ARIAS, J. J. R.; THIELEMANS, W. Efficient depolymerization of glass fiber reinforced PET composites. **Polymers**, v. 14, n. 23, p. 5171, 2022.

ARUNKUMAR, M. P. *et al.* Sound radiation and transmission loss characteristics of a honeycomb sandwich panel with composite facings: Effect of inherent material damping. **Journal of Sound and Vibration**, v. 383, p. 221–232, 2016.

ASSIS, A. A. DE. **Endentação dinâmica aplicada na predição de propriedades físico-mecânicas da madeira serrada e de painéis de madeira**. 2020. 95f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista - UNESP, Botucatu, 2020.

ASTARI, L. *et al.* Bioresource technology reports performance of self-binding engineered panels made from sweet corn stalks (*Zea mays* L.) for furniture applications. **Bioresource Technology Reports**, v. 25, p. 101802, 2024.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **E1252-98**: Standard practice for general techniques for obtaining infrared spectra for qualitative analysis. West Conshohocken, PA. 2021a.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **D1084-16**: Standard Test

Methods for Viscosity of Adhesives. West Conshohocken, PA. 2021b.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **D3171-22**: Standard test methods for constituent content of composite materials. Conshohocken, PA. 2022a.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **E2809-22**: Standard guide for using scanning electron microscopy/energy dispersive X-Ray spectroscopy (SEM/EDS) in forensic polymer examinations. Conshohocken, PA. 2022b.

ATAR, I. *et al.* Effects of hardener type, urea usage and conditioning period on the quality properties of particleboard. **Materials and Design**, v. 56, p. 91–96, 2014.

ATCP. **Manual de instalação e operação: Sonelastic**. Ribeirão Preto: ATCP Engenharia Física, 2015.

AURIGA, R. *et al.* Lignocellulosic biomass from grapevines as raw material for particleboard production. **Polymers**, v. 14, n. 12, p. 1–10, 2022.

AYRILMIS, N.; NEMLI, G. Effect of adhesive type on the quality properties of particleboard. **International Scientific Journals**, v. 11, n. 7, p. 364–365, 2017.

AZERÊDO, M. S. *et al.* Environmentally friendly adhesives derived from glycerol-based polymers. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 36, n. 1, p. 98–108, 2022.

BAHAROĞLU, M. *et al.* Effects of anatomical and chemical properties of wood on the quality of particleboard. **Composites Part B: Engineering**, v. 52, p. 282–285, 2013.

BALDIN, T. *et al.* Qualidade de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e capim-annoni. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 11, n. 3, p. 230–237, 2016.

BALEA, G. *et al.* Three adhesive recipes based on magnesium lignosulfonate, used to manufacture particleboards with low formaldehyde emissions and good mechanical properties. **Forests**, v. 13, p. 737, 2022.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 371–380, 2003.

BANSAL, R.; BARSHILIA, H. C.; PANDEY, K. K. Nanotechnology in wood science:

Innovations and applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 262, p. 130025, 2024.

BARGAS, L. DA S. **Carga tributária de empresas florestais produtoras de madeira de *Pinus* spp.: Um estudo de caso**. 2012. 94f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2012.

BATTISTELLE, R. A. G. *et al.* Physical and mechanical characterization of sugarcane bagasse particleboards for civil construction. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, v. 4, n. 4, p. 408–417, 2016.

BAYATKASHKOLI, A. *et al.* Comparing of performance of treated particleboard with alkaline copper quat, boron-fluorine-chromium-arsenic and chlorotalonil against microcerotermes diversus and anacanthotermes vagans termite. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 120, p. 186–191, 2017.

BAZZETTO, J. T. L.; BORTOLETTO, G.; BRITO, F. M. S. Effect of particle size on bamboo particle board properties. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 2, p. e20170125, 2019.

BEM, G. *et al.* Implementation of a dynamic thermal and illuminance control system in responsive facades: shading study. **Advances in Environmental and Engineering Research**, v. 3, n. 3, p. 1–15, 2022.

BENHAMOU, A. A. *et al.* Application of UF adhesives containing unmodified and phosphate-modified cellulose microfibers in the manufacturing of particleboard composites. **Industrial Crops and Products**, v. 176, p. 114318, 2022.

BENTHIEN, J. T.; LÜDTKE, J.; OHLMEYER, M. Effect of increasing core layer particle thickness on lightweight particleboard properties. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 77, n. 6, p. 1029–1043, 2019.

BEZERRA, J. B. **Painel aglomerado de *Tachigali ulgaris* oriundo de plantio de floresta homogênea da região amazônica**. 2023. 82f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade de São Paulo, Pirassununga. 2023

BHARDWAJ, K. *et al.* Conifers phytochemicals: A valuable forest with therapeutic

potential. **Molecules**, v. 26, n. 10, p. 3005, 2021.

BIANCHE, J. J. **Propriedades de aglomerado fabricado com partículas de Eucalipto (*Eucalyptus urophylla*), Paricá (*Schizolobium amazonicum*) e vassoura (*Sida spp.*)**. 2009. 81f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2009.

BIANCHE, J. J. *et al.* Propriedades de aglomerado fabricado com partículas de Eucalipto (*Eucalyptus urophylla*), Paricá (*Schizolobium amazonicum*) e vassoura (*Sida spp.*). **Cerne**, v. 18, n. 4, p. 623–630, 2012.

BOLGENHAGEN, A.; MELO, J. C. F.; SELLIN, N. Avaliação comparada dos parâmetros físico anatômicos que influenciam na colagem lateral de painéis de madeira de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. **Revista Brasileira de Contabilidade e Gestão**, v. 10, n. 17, p. 31–48, 2021.

BORAN, S. *et al.* The efficiency of tannin as a formaldehyde scavenger chemical in medium density fiberboard. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 5, p. 2487–2491, 2012.

BORGES, P. R. **Utilização de resíduo de lã de vidro em fabricação de concreto**. 2007. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, REDEMAT, Ouro Preto, 2007.

BORGES, P. R. *et al.* Incorporação de resíduo de lã de vidro em concreto. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 14, n. 4, p. 373–379, 2017.

BORIA, S. *et al.* Potential of wool felts in combination with glass fibres: Mechanical and low velocity impact assessment. **Composites Part B: Engineering**, v. 118, p. 158–168, 2017.

BRAHMIA, F. Z. *et al.* Comparative analysis of wettability with fire retardants of Poplar (*Populus cv. euramericana* I214) and Scots pine (*Pinus sylvestris*). **Surfaces and Interfaces**, v. 18, p. 100405, 2020.

BREDA, A. M. M. **Classificação para madeira de *Pinus* sp. livre de defeitos a partir dos anéis de crescimento**. 2022. 73f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2022.

BRITO, E. O. **Produção de chapas de partículas de madeira a partir de maravalhas de *Pinus elliottii* Engelm. var. *Elliottii* plantado no sul do Brasil.** 1995. 123f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

BRITO, F. M. S. *et al.* Technological properties of medium density particleboards produced with peanut (*Arachis Hypogaea*) and *Pinus Oocarpa* Hulls. **Floresta e Ambiente**, v. 29, n. 2, p. 20210101, 2022.

BRITO, F. M. S. *et al.* Painéis aglomerados: um referencial teórico. In: ANDRADE, J. K. B. (Ed.). **Estudos e tendências atuais em Ciências Ambientais e Agrárias.** Campina Grande: Licuri, 2023. p. 90–104.

BRITO, F. M. S.; BORTOLETTO, G.; PAES, J. B. Effect of leaching and particles size in some properties of particleboards produced with *Dendrocalamus asper*. **Scientia Forestalis**, v. 49, p. 1–12, 2021.

BÜYÜKSARI, Ü. Surface characteristics and hardness of MDF panels laminated with thermally compressed veneer. **Composites Part B: Engineering**, v. 44, n. 1, p. 675–678, 2013.

CADEMARTORI, P. H. G. *et al.* Alumina nanoparticles as formaldehyde scavenger for urea-formaldehyde resin: Rheological and in-situ cure performance. **Composites Part B: Engineering**, v. 176, p. 107281, 2019.

CAI, Z. *et al.* Influence of board density, mat construction, and chip type on performance of particleboard made from eastern redcedar. **Forest Products Journal**, v. 54, n. 9729, p. 226–232, 2004.

CAI, Z.; SENALIK, C. A.; ROSS, R. J. Mechanical properties of wood-based composite materials. In: Wood handbook - wood as an engineering material. In: **Wood Handbook - Wood as an engineering material.** Madison, WI: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; General Technical Report, Chapter 12, 2021. p. 15.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística - Princípios e Aplicações.** Porto Alegre: Artmed Editora S.A. p. 255, 2003.

- CANDAN, Z.; AKBULUT, T. Developing environmentally friendly wood composite panels by nanotechnology. **BioResources**, v. 8, n. 3, p. 3590–3598, 2013.
- CANDATEN, L. *et al.* Resinagem de pinus no Brasil: aspectos gerais, métodos empregados e mercado. In: EVANGELISTA, W. V. (Ed.). **Produtos Florestais não Madeireiros: tecnologia, mercado, pesquisas e atualidades**. Guarujá, SP: Editora Científica Digital, 2021. p. 44–58.
- CAO, Y. *et al.* The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 73–83, 2015.
- CARRASCO, E. V. M. *et al.* Avaliação das características mecânicas da madeira por meio de excitação por impulso. **Revista Matéria**, v. 22, p. 11936, 2017.
- CARVALHO, A. G. *et al.* Effect of adding yerba mate pruning residues in particleboard panels. **Revista Arvore**, v. 39, n. 1, p. 209–214, 2015.
- ÇAVDAR, A. D. Effect of zeolite as filler in medium density fiberboards bonded with urea formaldehyde and melamine formaldehyde resins. **Journal of Building Engineering**, v. 27, p. 101000, 2020.
- CAZELLA, P. H. DA S. *et al.* Polyethylene terephthalate (PET) as a recycled raw material for particleboards produced from pinus wood and biopolymer resin e. **Cleaner Production Journal**, v. 447, p. 141460, 2024.
- CELESTINO, V. R. DE B. **Estudo do comportamento físico e mecânico de painéis aglomerados fabricados com partículas de *Tectona grandis* e *Corymbia citriodora***. 2020. 210f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru, SP, 2020.
- CHAHUD, E. *et al.* Produção e avaliação do desempenho de painéis de partículas de madeira a partir de resíduos de podas de árvores urbanas. **Revista de Cultura e Extensão USP**, v. 8, p. 109, 2012.
- CHAPELLE, L. **Characterization and modelling of the mechanical properties of pressboard**. 2016. 130f. Thesis (Doctor of Philosophy, PhD, in applied mechanics) - Technical University of Denmark, København, 2016.
- CHAYDARREH, K. C. *et al.* Interaction between particle size and mixing ratio on

porosity and properties of tea oil camellia (*Camellia oleifera* Abel.) shells-based particleboard. **Journal of Wood Science**, v. 68, n. 1, p. 43, 2022.

CHEDDADI, R. *et al.* Imprints of glacial refugia in the modern genetic diversity of *Pinus sylvestris*. **Global Ecology and Biogeography**, v. 15, n. 3, p. 271–282, 2006.

CHEN, H.; YAN, N. Application of Western red cedar (*Thuja plicata*) tree bark as a functional filler in pMDI wood adhesives. **Industrial Crops and Products**, v. 113, p. 1–9, 2018.

COLLETT, B. M. A review of surface and interfacial adhesion in wood science and related fields. **Wood Science and Technology**, v. 6, n. 1, p. 1–42, 1972.

COLLI, A. *et al.* Propriedades de chapas fabricadas com partículas de madeira de paricá (*Schyzolobium amazonicum* Huber ex. Ducke) e fibras de coco (*Cocos nucifera* L.). **Revista Árvore**, v. 34, n. 2, p. 333–338, 2010.

CONNER, A. H.; BHUIYAN, M. S. H. Wood: Adhesives. In: **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**. Amsterdam; New York: Elsevier, 2017. p. 18.

COSTA, L. L. *et al.* Painel particulado de baixa densidade produzido com resíduos de sisal. **Ambiente Construído**, v. 24, p. 128066, 2024.

DARWISH, E. A.; ELDEEB, A. S. Utilizing agro-industrial wastes panels in developing cost-efficient thermally insulating wall claddings for residential energy retrofitting in Egypt. **Energy and Built Environment**, v. 5, n. 5, p. 683–703, 2024.

DASHTI, H. *et al.* The effect of nanoclay on the mass transfer properties of plywood. **Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures**, v. 7, n. 2, p. 853–860, 2012.

DELATORRE, F. M. *et al.* Photoluminous response of biocomposites produced with charcoal. **Polymers**, v. 15, n. 18, p. 3788, 2023.

DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, E. T. G. **Princípios e aplicações de análise térmica**. São Carlos, SP: IQSC, 2012.

DHANAPAL, S.; SINGH, M.; NAGAMMANAVAR, U. Influence of rice straw and wood fiber combination on physical and mechanical properties of rice straw pulverized

composite board. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 26, p. 37, 2024.

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

DORES, A. M. B. *et al.* Panorama Setorial: Setor Florestal, Celulose e Papel. In: FILHO, E. T. T.; PUGA, F. P. (Eds.). **Perspectivas do investimento 2007/2010**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2007. p. 107–134.

DORIEH, A. *et al.* Recent developments in the performance of micro/nanoparticle-modified urea-formaldehyde resins used as wood-based composite binders: A review. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 114, p. 103106, 2022.

DUDKIN, B. N.; KRIVOSHAPKIN, V. P.; KRIVOSHAPKINA, E. F. Effect of aluminum oxide nanoparticles on the properties of urea-formaldehyde resin. **Russian Journal of Applied Chemistry**, v. 79, n. 9, p. 1522–1525, 2006.

DUKARSKA, D. *et al.* Characterisation of wood particles used in the particleboard production as a function of their moisture content. **Materials**, v. 15, n. 1, p. 48, 2022.

DUKARSKA, D.; BARTKOWIAK, M. The effect of organofunctional nanosilica on the cross-linking process and thermal resistance of UF resin. **Journal of Polymer Research**, v. 23, n. 8, p. 166, 2016.

DUNKY, M. Adhesives in the wood Industry. In: PIZZI, A., MITTAL, K. L. (Ed.). **Handbook of Adhesive Technology, Third Edition**. Nova York: Taylor & Francis Group: LLC, 2003. p. 511–587.

DURAN, A. J. F. *et al.* Avaliação de painéis de média densidade de bagaço de cana-de-açúcar. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 3, p. 1–16, 2023.

EFFAH, B. **The use of atomic force microscopy to determine intermolecular adhesive forces in wood based composite materials**. 2017. 102f. Dissertation (Doctor of Philosophy in Forestry) - Faculty of AgriSciences at Stellenbosch

University, Stellenbosch, 2017.

EVANGELISTA, N. **Estudo da utilização de resíduos industriais de lã cerâmica e lã de vidro em argamassas e concretos**. 2011. 165f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

EVANGELISTA, N.; TENÓRIO, J. A. S.; OLIVEIRA, J. R. DE. Pozzolanicity of the industrial wastes, glass and ceramic wools. **Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 1, p. 79–85, 2012.

FEHRMANN, J.; BELLEVILLE, B.; OZARSKA, B. Effects of particle dimension and constituent proportions on internal bond strength of ultra-low-density hemp hurd particleboard. **Forests**, v. 13, n. 11, p. 1967, 2022.

FERDOSIAN, F. *et al.* Bio-based adhesives and evaluation for wood composites application. **Polymers**, v. 9, n. 2, p. 70, 2017.

FERLA, A. K. **Métodos de aprendizado de máquina para o mapeamento de florestas de Pinus utilizando dados de alta resolução espacial e elaboração de um mapa de risco**. 2023. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2023.

FERNANDES, D. *et al.* Eficiência acústica: Lã de vidro e de lã de rocha como isolantes para o sistema drywall. **Anais da Engenharia Civil**, v. 1, n. 1, p. 115–129, 2018.

FERRANDEZ-GARCIA, C. C. *et al.* Fire-resistance, physical, and mechanical characterization of binderless rice straw particleboards. **BioResources**, v. 12, p. 8539–8549, 2017.

FERRANDEZ-VILLENA, M. *et al.* The influence of processing and particle size on binderless particleboards made from *Arundo donax* L. Rhizome. **Polymers**, v. 12, n. 3, p. 696, 2020.

FERREIRA, A. M. *et al.* Low-cost natural binder for particleboards production: study of manufacture conditions and stability. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 93, p. 59–63, 2019.

FERRO, F. S. *et al.* Painel híbrido OSB/MDP de madeira *Pinus taeda* e resina

poliuretana à base de óleo de mamona. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 3, p. 7–14, 2019.

FILHO, L. E. C. *et al.* Oriented Strand Board panels of residual reforestation wood with Al₂O₃ nanoparticles. **Industrial Crops and Products**, v. 200, p. 116777, 2023.

FRADINHO, D. M. *et al.* Chemical characterisation of bark and of alkaline bark extracts from maritime pine grown in Portugal. **Industrial Crops and Products**, v. 16, n. 1, p. 23–32, 2002.

FRAGA-CORRAL, M. *et al.* Technological application of tannin-based extracts. **Molecules**, v. 25, n. 3, p. 1–27, 2020.

FRANÇA, M. C. *et al.* Produção de painéis aglomerados homogêneos a partir de fibras oversize residuais de uma indústria de MDF. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 111, p. 665–674, 2016.

FRANÇA, M. C. *et al.* Utilização de fibras oversize resinadas de pinus na produção de painéis aglomerados. **Revista Árvore**, v. 43, n. 5, p. 1–9, 2019.

FREIRE, A. L. F.; ROSA, M. F. Environmental impacts of wood paneling and derivatives - A literature review. **Revista Espacios**, v. 36, n. 10, p. 1–12, 2015.

FREY, M. A. **Delignified and densified wood - a versatile concept for new high-performance wood-based materials**. 2020. 155f. Thesis (Doctor of Sciences) - ETH Zurich, 2020.

FRIHART, C. R. Adhesive bonding and performance testing of bonded wood products. **ASTM Special Technical Publication**, v. 2, n. 1463, p. 1–12, 2005.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesives with Wood Materials - Bond Formation and Performance. In: GTR-190, G. TECHNICAL REPORT F. (Ed.). **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. p. 10.1-10.24.

FURTINI, A. C. C. *et al.* Using miriti petiole to produce particleboards. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 2, p. 149–162, 2023.

GHANI, A. *et al.* Reducing formaldehyde emission of urea formaldehyde-bonded

particleboard by addition of amines as formaldehyde scavenger. **Building and Environment**, v. 142, p. 188–194, 2018.

GHANI, A. *et al.* Physico-mechanical properties and formaldehyde emission of rubberwood particleboard made with UF resin admixed with ammonium and aluminium-based hardeners. **Building and Environment**, v. 142, n. 1, p. 473–488, 2019.

GILLELA, S. *et al.* Effects of addition of nanoclay in phenol-formaldehyde resins on the properties of *Lantana camara* fibre composites. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 36, n. 1, p. 40–50, 2024.

GONÇALVES, F. G. **Painéis aglomerados de madeira de *Acacia mangium* com adesivos de uréia- formaldeído e tanino em pó da casca de *Acacia mearnsii***. 2012. 105f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédia, RJ, 2012.

GONÇALVES, F. G. *et al.* X-ray densitometry in the evaluation of density in particleboard panel. **Ciencia Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1151–1162, 2018.

GONÇALVES, F. G. *et al.* Tannin extraction from heat-treated *Pinus* spp bark - Application as an adhesive. **Madera y Bosques**, v. 27, n. 1, p. 1–9, 2021.

GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C. Propriedades de duas resinas sintéticas após adição de tanino modificado. **Floresta e Ambiente**, v. 16, p. 01–07, 2009.

GUIMARÃES, J. B. *et al.* Efeito do teor da parafina nas propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados de *Pinus oocarpa*. **Revista Ciência da Madeira**, v. 4, n. 1, p. 72–82, 2013.

GUL, W. *et al.* Effect of iron oxide nanoparticles on the physical properties of medium density fiberboard. **Polymers**, v. 12, n. 12, p. 1–18, 2020.

GUMUS, N.; DOGANCI, E.; AYTAC, A. Evaluations of the effects of different flame retardants combinations on particleboards produced using urea–formaldehyde resin. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 82, n. 3, p. 747–759, 2024.

GUPTA, A. *et al.* Valorization potential of pine needle waste biomass: recent trends and future perspectives. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n.

25, p. 36136–36151, 2024.

GUTERRES, T. F. DE A. N. **Propriedades de colagem de lignosulfonatos e de suas misturas com adesivos sintéticos e tanino de Acácia negra**. 2015. 26f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2015.

HAAFIZ, M. K. M. *et al.* Isolation and characterization of cellulose nanowhiskers from oil palm biomass microcrystalline cellulose. **Carbohydrate Polymers**, v. 103, n. 1, p. 119–125, 2014.

HARADA, T.; UESUGI, S.; MASUDA, H. Fire resistance of thick wood-based boards. **Journal of Wood Science**, v. 52, n. 6, p. 544–551, 2006.

HASELEIN, C. R. *et al.* Resistência mecânica e à umidade de painéis aglomerados com partículas de madeira de diferentes dimensões. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 2, p. 127–134, 2002.

HASHIM, R. *et al.* Effect of particle geometry on the properties of binderless particleboard manufactured from oil palm trunk. **Materials and Design**, v. 31, n. 9, p. 4251–4257, 2010.

HELLMEISTER, V. **Painel OSB de resíduo de madeira Balsa (*Ochroma pyramidale*)**. 2017. 144f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2017.

HEMMILÄ, V. *et al.* Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels-A Review. **RSC Advances**, v. 7, n. 61, p. 38604–38630, 2017.

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

HIDAYAT, W. *et al.* Performance of eco-friendly particleboard from agro-industrial residues bonded with formaldehyde-free natural rubber latex adhesive for interior applications. **Polymer Composites**, v. 43, n. 4, p. 2222–2233, 2022.

HOSSEINI, S. B. *et al.* Partial replacement of urea-formaldehyde adhesive with fungal biomass and soy flour in plywood fabrication. **Journal of Adhesion Science**

and Technology, v. 34, n. 13, p. 1371–1384, 2020.

HSE, C. Y.; KUO, M. LIN. Influence of extractives on wood gluing and finishing - a review. **Forest Products Journal**, v. 38, n. 1, p. 52–56, 1988.

HUSSIN, M. H. *et al.* Latest advancements in high-performance bio-based wood adhesives: A critical review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 21, p. 3909–3946, 2022.

IBÁ. **Indústria Brasileira de Árvores - Relatório Anual**. Brasília: versão eletrônica, 2024.

IOANNOU, E. *et al.* The genus *Pinus*: a comparative study on the needle essential oil composition of 46 pine species. **Phytochemistry Reviews**, v. 13, n. 4, p. 741–768, 2014.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 11925-2**. Geneva, Switzerland. 2020.

IWAKIRI, S. **A influência de variáveis de processamento sobre propriedades de chapas de partículas de diferentes espécies de Pinus**. 1989. 129f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

IWAKIRI, S. *et al.* Resíduos de serrarias na produção de painéis de madeira de Eucalipto. **Scientia Agraria**, v. 1, n. 1, p. 23, 2000.

IWAKIRI, S. *et al.* Produção de compensados de *Pinus elliottii* L. e *Pinus oocarpa* Schiede com diferentes formulações de adesivo uréia formaldeído. **Árvore**, v. 26, p. 371–375, 2002.

IWAKIRI, S. *et al.* Avaliação do potencial de uso de espécies de pinus tropicais e eucalipto na produção de painéis compensados ureicos. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 277, 2012a.

IWAKIRI, S. *et al.* Evaluation of the properties of particleboard made from sawmill waste of nine tropical wood species of Amazon. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 1, p. 59–64, 2012b.

IWAKIRI, S. *et al.* Produção de painéis compensados estruturais com diferentes composições de lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea*. **Revista Árvore**, v. 36, n. 3, p. 569–576, 2012c.

IWAKIRI, S. *et al.* Painéis de Madeira Aglomerada. In: IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R. (Eds.). **Painéis de Madeira Reconstituída**. 2. ed. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 2020a. p. 136–177.

IWAKIRI, S. *et al.* Evaluation of physical and mechanical properties of particleboard produced from wood of *Cupressus Torulosa* in mixture with *Pinus Taeda*. **Floresta**, v. 50, n. 3, p. 1478–1485, 2020b.

JAMNANI, B. D. *et al.* Thermochemical properties of glass wool/maerogel composites. **Advances in Materials Science and Engineering**, p. 1–5, 2016.

JANISZEWSKA-LATTERINI, D. *et al.* Effect of wood adhesive modification with liquefied lignocellulosic biomass and nanocellulose on the formaldehyde and volatile organic compounds emissions of particleboards. **Wood Material Science & Engineering**, v. 19, n. 2, p. 451–461, 2023.

JÄRVELÄ, P.; POHJONEN, T.; TÖRMÄLÄ, P. An empirical model of the strength of a porous glass wool composite. **Composites Science and Technology**, v. 23, p. 113–130, 1985.

JERÓNIMO, A.; FERNANDES, M.; BRIGA-SÁ, A. Experimental study on the potential utilization of olive oil production wastes and by-products as building materials. **Sustainability**, v. 16, n. 4, p. 1355, 2024.

KAPOOR, A.; MUDGAL, S.; MURUGANANDAM, L. Impact of shock waves on glass wool composition and properties. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 7056–7060, 2021.

KARAGIANNIDIS, E.; MARKESSINI, C.; ATHANASSIADOU, E. Micro-fibrillated cellulose in adhesive systems for the production of wood-based panels. **Molecules**, v. 25, p. 4846, 2020.

KARIUKI, S. W. *et al.* Formaldehyde use and alternative biobased binders for particleboard formulation: A review. **Journal of Chemistry**, v. 2019, p. 5256897,

2019.

KARIUKI, S. W. *et al.* Characterization of composite material from the copolymerized polyphenolic matrix with treated cassava peels starch. **Heliyon**, v. 6, n. 7, p. 04574, 2020.

KAWALERCZYK, J. *et al.* The effect of pressing parameters and hardener content on the properties of plywood bonded with propylamine-UF adhesive. **Wood Material Science and Engineering**, v. 19, n. 3, p. 710–717, 2023.

KEINERT, A. C. **Resistência à umidade e emissão de formaldeído em painéis de partículas de média densidade fabricados com diferentes resinas melanina ureia formaldeído**. 2021. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2021.

KENGEN, S. **Forestry in Brazil: A brief history**. Brasília, 2019.

KHANJANZADEH, H. *et al.* Application of surface chemical functionalized cellulose nanocrystals to improve the performance of UF adhesives used in wood based composites - MDF type. **Carbohydrate Polymers**, v. 206, p. 11–20, 2019.

KHORRAMABADI, L. A.; BEHROOZ, R.; NAJAFI, S. K. Reduction of formaldehyde emission from medium density fiberboard using nanoclay modified with 3-aminopropyltriethoxysilane and L-Lysine as additives to urea-formaldehyde adhesive. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 125, p. 1–8, 2023.

KOLLMANN, F. F.; CÔTÉ, W. A. Principles of wood science and technology. In: **Principles of Wood Science and Technology**. Berlin: Springer -Verlag, 1968. p. 605.

KUMAR, A. *et al.* Influence of activated charcoal as filler on the properties of wood composites. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 46, p. 34–39, 2013.

LARENA, A.; URREAGA, J. M.; ORDEN, M. U. LA. Thermal and FTIR study of E-glass short fiber functionalization with chloromethyldimethylchlorosilane. **Journal of Colloid And Interface Science**, v. 142, n. 1, p. 111–115, 1991.

LAUDARES, F. A. L. *et al.* Avaliação das propriedades acústicas de mogno africano

(*Khaya ivorensis*) submetido a tratamento térmico em estufa e autoclave. **Revista Materia**, v. 28, n. 1, p. 20230035, 2023.

LEE, H. *et al.* Effects of casein on flammability and mechanical characteristics of medium density fibreboards based on formaldehyde-free resin system. **Materials Today: Proceedings**, v. 2023, p. 2214–7853, 2023.

LEE, S. J.; THOLE, V. Investigation of modified water glass as adhesive for wood and particleboard : mechanical , thermal and flame retardant properties. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 76, n. 5, p. 1427–1434, 2018.

LEI, H. *et al.* Influence of nanoclay on urea-formaldehyde resins for wood adhesives and its model. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 116, n. 5, p. 2658–2667, 2008.

LEMOUGNA, P. N. *et al.* Thermal stability of one-part metakaolin geopolymer composites containing high volume of spodumene tailings and glass wool. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103792, 2020.

LENG, W.; HUNT, J. F.; TAJVIDI, M. Screw and nail withdrawal strength and water soak properties of wet-formed cellulose nanofibrils bonded particleboard. **BioResources**, v. 12, n. 4, p. 7692–7710, 2017.

LENGOWSKI, E. C.; BONFATTI, E. A. Nanocelulose: Aplicações na indústria de base florestal. In: SILVA-MATOS, R. R. S. DA; PARRA-SERRANO, L. J. (Eds.). **Sustentabilidade de Recursos Florestais 2**. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. p. 155–164.

LI, Z. *et al.* Early-age properties of alkali-activated slag and glass wool paste. **Construction and Building Materials**, v. 291, p. 123326, 2021.

LIAW, J. D. *et al.* Corn distiller's dried grains with solubles (DDGS) - A value added functional material for wood composites. **Industrial Crops and Products**, v. 139, p. 111525, 2019.

LIMA, A. J. M. *et al.* Studies on the durability of wood-cement particleboards produced with residues of *Pinus* spp., Silica Fume, and Rice Husk Ash. **BioResources**, v. 15, n. 2, p. 3064–3086, 2020.

LIMA, F. O. *et al.* ZnO nanoparticle: production and use for particleboard improvement. **Concilium**, v. 23, n. 6, p. 420–429, 2023.

LIMA, K. E. J. B.; ZENERATO, T. S. **Comparativo de desempenho acústico de mdf e drywall e suas composições com lã de vidro e lã de rocha**. 2016. 74f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

LIU, S. *et al.* H₂O₂-mediated tannin bio-based wood adhesive inspired by starfish structure and phenol-amine synergy. **Industrial Crops and Products**, v. 188, p. 115714, 2022.

LIU, Y. *et al.* Synthesis of microcapsules containing a formaldehyde scavenger for the sustainable control of hazardous chemical release from particleboard. **Journal of Hazardous Materials**, v. 443, p. 130156, 2023.

LIU, Y.; ZHU, X. Measurement of formaldehyde and VOCs emissions from wood-based panels with nanomaterial-added melamine-impregnated paper. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 132–137, 2014.

LÓPEZ-ÁLVAREZ, Ó.; ZAS, R.; MAREY-PEREZ, M. Resin tapping: A review of the main factors modulating pine resin yield. **Industrial Crops and Products**, v. 202, p. 117105, 2023.

LOPEZ, Y. M. *et al.* Comparative study of different technological processes on the physical-mechanical properties and flammability of wood plastic composite. **Journal of Building Engineering**, v. 52, p. 104391, 2022.

LUCKMAN, S. S. *et al.* Influência da incorporação de lignina Kraft à resina ureia-formaldeído nas propriedades tecnológicas de painéis aglomerados convencionais. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 131, p. 1–13, 2021.

LUND, M. D.; YUE, Y. Fractography and tensile strength of glass wool fibres. **Journal of the Ceramic Society of Japan**, v. 116, n. 1356, p. 841–845, 2008.

MACEDO, L. B. *et al.* Propriedades físicas de painéis aglomerados de madeira produzidos com adição de película de polipropileno biorientado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 7, p. 674–679, 2015.

MACHADO, J. P. **Efeito da adição do bagaço da cana-de-açúcar e/ou lã de vidro sobre as propriedades físicas e de dilatação térmica linear dos concretos**. 2018. 154f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2018.

MACHADO, J. P. *et al.* Mechanical behavior of cementitious composites reinforced with the fiber of sugarcane bagasse and glass wool waste. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 20, n. 4, p. 3765–3774, 2023.

MADYARATRI, E. W. *et al.* Effect of lignin or lignosulfonate addition on the fire resistance of areca (*Areca catechu*) particleboards bonded with ultra-low-emitting urea-formaldehyde resin. **Fire**, v. 6, n. 8, p. 1–15, 2023.

MAHIEU, A. *et al.* Performance of particleboards based on annual plant byproducts bound with bio-adhesives. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 107, p. 102847, 2021.

MAHRDT, E. *et al.* Effect of addition of microfibrillated cellulose to urea-formaldehyde on selected adhesive characteristics and distribution in particle board. **Cellulose**, v. 23, n. 1, p. 571–580, 2016.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard e dry-process fiberboard manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman Publication. 689 p., 1993.

MAMIŃSKI, M.; BORYSIUK, P.; PARZUCHOWSKI, P. G. Improved water resistance of particleboards bonded with glutaraldehyde-blended UF resin. **Holz Roh Werkst**, v. 66, n. 5, p. 381–383, 2008.

MARHOON, I. I.; RASHEED, A. K. Mechanical and physical properties of glass wool-rigid polyurethane foam composites. **College of Engineering Journal (NUCEJ)**, v. 18, n. 1, p. 41–49, 2015.

MARTINS, R. S. F. *et al.* Investigation of agro-industrial lignocellulosic wastes in fabrication of particleboard for construction use. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 102903, 2021.

MEFTAH, R. *et al.* Multiscale characterization of glass wools using X-ray micro-CT. **Materials Characterization**, v. 156, p. 109852, 2019.

MELO, R. R.; MENEZZI, C. H. S. Influência da massa específica nas propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados. **Silva Lusitana**, v. 18, n. 1, p. 59–73, 2010.

MIYAMOTO, K.; NAKAHARA, S.; SUZUKI, S. Effect of particle shape on linear expansion of particleboard. **Journal of Wood Science**, v. 48, n. 3, p. 185–190, 2002.

MO, X.; SUN, X. S. Soy proteins as plywood adhesives: Formulation and characterization. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 27, n. 18–19, p. 2014–2026, 2013.

MOREIRA, R. C. S.; QUADROS, N. K.; ALVES, V. S. Análise do mercado de goma resina no Cone Sul de Rondônia no ano de 2016. **Diálogos: Economia e Sociedade**, n. 1, p. 108–122, 2016.

MORIANA, R.; VILAPLANA, F.; EK, M. Cellulose nanocrystals from forest residues as reinforcing agents for composites: A study from macro- to nano-dimensions. **Carbohydrate Polymers**, v. 139, p. 139–149, 2016.

MORTARI, D. A. *et al.* Interpretação do mecanismo de difusão no processo gás-sólido da reação de dessulfurização. **Química Nova**, v. 33, n. 9, p. 1887–1891, 2010.

MOSLEMI, A. *et al.* Addition of cellulose nanofibers extracted from rice straw to urea formaldehyde resin; effect on the adhesive characteristics and medium density fiberboard properties. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 99, p. 102582, 2020.

MOUTOUSIDIS, D. *et al.* Reinforcement of urea formaldehyde resins with pectins derived from orange peel residues for the production of wood-based panels. **Sustainable Chemistry for the Environment**, v. 4, p. 100037, 2023.

MUSTEFAGA, E. C. *et al.* Hybrid panels produced with particles and veneers of pine wood in different compositions. **Revista Arvore**, v. 48, p. 1–11, 2024.

MÜZEL, S. D. **Madeira de *Hevea brasiliensis* como matéria prima para a produção de chapa de partículas aglomeradas**. 2013. 80f. Monografia

(Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2013.

NAGAMADHU, M. *et al.* Influence of extender on thermo-mechanical properties of melamine-urea-formaldehyde (MUF) for wood adhesive applications. **Materials Today: Proceedings**, v. 24, p. 2274–2282, 2019.

NAJAH, A. *et al.* Harvesting value from agricultural waste: Dimensionally stable fiberboards and particleboards with enhanced mechanical performance and fire retardancy through the use of lignocellulosic nanofibers. **Industrial Crops and Products**, v. 204, p. 117336, 2023.

NAPOLI, L. M. *et al.* Propriedades físicas da madeira e de painéis aglomerados produzidos com misturas de espécies florestais. **Floresta**, v. 43, n. 3, p. 475, 2013.

NARCISO, C. R. P. *et al.* Potential for the use of coconut husk in the production of medium density particleboard. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, n. 3, p. 1647–1658, 2021.

NELSON, M. L.; O'CONNOR, R. T. Relation of certain infrared bands to cellulose crystallinity and crystal lattice type. Part II. A new infrared ratio for estimation of crystallinity in celluloses I and II. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 8, n. 3, p. 1325–1341, 1964.

NEMLI, G.; DEMIREL, S. Relationship between the density profile and the technological properties of the particleboard composite. **Journal of Composite Materials**, v. 41, n. 15, p. 1793–1802, 2007.

NIEKERK, I. A.; PIZZI, A. Characteristic industrial technology for exterior Eucalyptus particle board. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 52, n. 2, p. 109–112, 1994.

NISULA, L. **Wood Extractives in Conifers: A Study of Stemwood and Knots of Industrially Important Species**. 2018. 372f. Thesis - Åbo Akademi University, Åbo, Finland, 2018.

NOCE, R. *et al.* Competitividade do Brasil no mercado internacional de aglomerado. **Revista Árvore**, v. 32, n. 1, p. 113–118, 2007.

NUNES, S. T. **Efeito da pressão e temperatura na qualidade de chapas de**

partículas homogêneas de *Pinus elliotti* Engelm. 2008. 38f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Campina Grande, Patos, 2008.

NURYAWAN, A. *et al.* Urea-formaldehyde resins: Production, application, and testing. **Innovation in Polymer Science and Technology**, v. 223, n. 1, p. 012053, 2017.

NURYAWAN, A. *et al.* Hydrolysis of particleboard bonded with urea-formaldehyde resin for recycling. **Heliyon**, v. 6, n. 5, 2020.

NURYAWAN, A.; SINGH, A. P.; PARK, B. D. Swelling behaviour of cured urea-formaldehyde resin adhesives with different formaldehyde to urea mole ratios. **Journal of Adhesion**, v. 91, n. 9, p. 677–700, 2015.

OLIVEIRA, M. S. **Utilização de resíduos de *Pinus* spp. na produção de blocos de concreto para alvenaria de vedação.** 2020. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

ONAT, S. M.; KELLECI, O. Effects of silane treatment on physical and mechanical properties of particleboards prepared with urea formaldehyde. **Drvna Industrija**, v. 73, n. 4, p. 439–444, 2022.

OTTO, W. H. Compaction effects in glass fibers. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 44, n. 2, p. 68–72, 1961.

OUIS, D. On the frequency dependence of the modulus of elasticity of wood. **Wood Science and Technology**, v. 36, n. 4, p. 335–346, 2002.

OWODUNNI, A. A. *et al.* Adhesive application on particleboard from natural fibers: A review. **Polymer Composites**, v. 41, n. 11, p. 4448–4460, 2020.

ÖZDEMİR, F.; ODABAS, Z.; TUTUS, A. Investigation of the effect of some fire retardant chemicals and mineral materials used in surface coating on combustion performance of particleboard. **BioResources**, v. 12, n. 4, p. 8862–8869, 2017.

PAIVA, A. *et al.* A contribution to the thermal insulation performance characterization of corn cob particleboards. **Energy and Buildings**, v. 45, p. 274–279, 2012.

PARK, B. D.; KANG, E. C.; PARK, J. Y. Crystallization behavior of poly(ϵ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 116, n. 5, p. 2658–2667, 2008.

PEŁDZIK, M.; JANISZEWSKA, D.; ROGOZIŃSKI, T. Alternative lignocellulosic raw materials in particleboard production: A review. **Industrial Crops and Products**, v. 174, p. 114162, 2021.

PEIXOTO, G. L.; BRITO, E. O. Avaliação da granulometria de partículas de *Pinus taeda* combinadas com adesivos comerciais para a fabricação de aglomerados. **Floresta e Ambiente**, v. 7, p. 60–67, 2000.

PEREIRA, C. L. **Aproveitamento do resíduo do coco verde para produção de compósitos destinados à construção rural**. 2012. 137f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2012.

PEREIRA, F. J. C. **Aditivos naturais para redução de emissões de formaldeído de resinas ureia-formaldeído**. 2015. 50f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2015.

PICCOLO, A. **Alteration and protection methods for glass in Cultural Heritage**. 2022. 88f. Thesis - Ca' Foscari University of Venice, Venice, 2022.

PIZZI, A. **Advanced Wood Adhesives Technology**. New York, Basel, Hong Kong: Marcel Dekker, Inc., 1994.

PIZZI, A. Urea–Formaldehyde Adhesives. In: PEARSON, C.; PIZZI, A.; MITTAL, K. (Eds.). **Handbook of Adhesive Technology, Revised and Expanded**. 2. ed. Boca Raton: Marcel Dekker, Inc., 2003a. p. 635–652.

PIZZI, A. Natural Phenolic Adhesives II. In: PEARSON, C.; PIZZI, A.; MITTAL, K. (Eds.). **Handbook of Adhesive Technology, Revised and Expanded**. Boca Raton: Marcel Dekker, Inc., 2003b. p. 573–588.

PIZZI, A. Phenolic Resin Adhesives. In: PEARSON, C.; PIZZI, A.; MITTAL, K. (Eds.). **Handbook of Adhesive Technology, Revised and Expanded**. 2. ed. Boca Raton: Marcel Dekker, Inc., 2003c. p. 541–572.

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Wood Adhesives**. Leiden - Boston: CRC Press Taylor &

Francis Group, 2010.

PRASAD, M. M. *et al.* Study on mechanical properties and microstructural analysis of glass wool fiber, silicon added epoxy hybrid composite. **Materials Today: Proceedings**, v. 77, p. 509–514, 2023.

PRATA, J. G. **Estudo da viabilidade tecnológica do uso de espécies de Pinus tropicais para a produção de painéis colados lateralmente (Edge Glued Panels - EGP)**. 2010. 114f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

PREMOLI, A. C. *et al.* Patterns of genetic variation in tree species and their implications for conservation. In: NEWTON, A. C. (Ed.). **Biodiversity Loss and Conservation in Fragmented Forest Landscapes: The Forests of Montane Mexico and Temperate South America**. Cambridge, MA: CAB International, 2007. p. 120–156.

QIAOJIA, L. *et al.* Property of nano-SiO₂/urea formaldehyde resin. **Production**, v. 7, n. 27, p. 2008–2010, 2006.

QMS. **Quintek Measurement Systems**. Density Profiler Model QDP-01X. Knoxville. 1999.

RABELO, L. K. L. *et al.* Cenário de árvores plantadas no Brasil. **Biodiversidade**, v. 19, n. 3, p. 170–179, 2020.

RAFIGHI, A.; DOROSTKAR, A.; MADHOUSH, M. Investigation on mechanical properties between of composite made of poplar and alder sawdust and high density polyethylene. **International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology**, v. 1, n. 10, p. 134–141, 2014.

RAMESH, M. *et al.* A critical review on wood-based polymer composites : **Polymers**, v. 14, p. 589, 2022.

REGMI, S. *et al.* High fiber fraction DDGS – A functional filler for manufacturing low-density particleboards. **Industrial Crops and Products**, v. 181, p. 114793, 2022.

RESENDE, R. T. **Pínus: do plantio à colheita**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2023.

RIBASKI, N. G. *et al.* Cidades sustentáveis e o aproveitamento de resíduos de poda urbana para transformação em painéis aglomerado. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, v. 16, n. 1, p. 65–72, 2023.

RICHARDSON, D. M. *et al.* Human impacts in pine forests: Past, present, and future. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 38, p. 275–297, 2007.

RINALDELLI, I. **Análise térmica diferencial e termogravimétrica aplicada à avaliação da queimabilidade de farinhas na produção do clínquer portland**. 2013. 52f. Monografia (Graduação em Geociências) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

RIOS, P. D. A.; PEREIRA, G. F.; VIEIRA, H. C. Avaliação do potencial da madeira de *Pinus patula* Schlttdl . & Cham para a produção de painéis de madeira aglomerada. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 10, p. 497–508, 2016.

RIVER, B. H.; VICK, C. B.; GILLESPIE, R. H. **Wood as an adherend**. New York: Marcel Dekker, Inc., 1991.

RODRÍGUEZ-GARCÍA, A. *et al.* Resin yield in *Pinus pinaster* is related to tree dendrometry, stand density and tapping-induced systemic changes in xylem anatomy. **Forest Ecology and Management**, v. 313, p. 47–54, 2014.

RODRÍGUEZ, S. M.; ORDÁS, R. J.; ALVAREZ, J. M. Conifer Biotechnology: An Overview. **Forests**, v. 13, n. 7, 2022.

ROITMAN, L. **Avaliação das propriedades de sete espécies de madeiras da amazônia brasileira para fabricação de instrumentos musicais**. 2021. 127f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

ROUMELI, E. *et al.* Synthesis, characterization and thermal analysis of urea–formaldehyde/nanoSiO₂ resins. **Thermochimica Acta**, v. 527, p. 33–39, 2012.

ROVEDDER, P. *et al.* Propriedades físicas e químicas da madeira de *Pinus elliottii* impregnada com sílica. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 49, n. 130, p. 1–12, 2021.

ROVIRA, J. *et al.* Human health risks of formaldehyde indoor levels: An issue of

concern. **Journal of Environmental Science and Health**, v. 51, n. 4, p. 357–363, 2016.

RUDAWSKA, A. The influence of curing conditions on the strength of adhesive joints. **Journal of Adhesion**, v. 96, p. 402–422, 2019.

SALARI, A. *et al.* Improving some of applied properties of oriented strand board (OSB) made from underutilized low quality paulownia (*Paulownia fortunei*) wood employing. **Industrial Crops & Products**, v. 42, p. 1–9, 2013.

SANCHES, F. L. **Qualidade de painéis aglomerados produzidos com mistura de madeira de quatro espécies florestais**. 2012. 80f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Estadual do Centro Oeste, Irati, 2012.

SANTIAGO, S. B. *et al.* Colagem de madeira de eucalipto com adesivos naturais. **Revista Matéria**, v. 23, n. 3, p. 12151, 2018.

SANTOS, C. V. F. **Método de ensaio para a determinação da resistência ao cisalhamento em elementos estruturais de madeira de *Pinus* spp.** 2016. 82f. Dissertação (Mestre em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SANTOS, M. P. **Regeneração natural de *Pinus* spp. ao redor de populações experimentais e fatores envolvidos no processo de invasão**. 2020. 46f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2020.

SANTOS, H. F. *et al.* Brazil's competitiveness in exportation of forest products from 2008 to 2018. **Revista Arvore**, v. 46, p. 1–10, 2022.

SANTOS, J. *et al.* Valorisation of non-timber by-products from maritime pine (*Pinus pinaster*, Ait) for particleboard production. v. 168, p. 113581, 2021.

SANTOS, K. V. G. **Painéis de partícula com resíduo agroindustrial mercerizado: Caracterização das propriedades físico-mecânicas**. Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2024.

SCATOLINO, M. V. *et al.* Eucalyptus wood and coffee parchment for particleboard production: Physical and mechanical properties. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 41, n. 2, p. 139–146, 2017.

SEEKAMP, H. Die klassifizierung der brennbarkeit holzhaltiger platten. **European Journal of Wood and Wood Industries**, v. 12, n. 5, p. 189–197, 1954.

SEGAL, L. *et al.* An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-Ray diffractometer. **Textile Research Journal**, v. 29, n. 10, p. 786–794, 1959.

SEGUNDINHO, P. G. A. *et al.* Influência do teor de umidade na determinação do módulo de elasticidade de vigas de *Pinus* sp. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 319–329, 2017.

SERAJI, M. M. *et al.* Performance evaluation of glass and rock wool fibers to improve thermal stability and mechanical strength of monolithic phenol-formaldehyde based carbon aerogels. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 491, p. 89–97, 2018.

SHARMA, P. *et al.* Research work on fiber glass wool reinforced and epoxy matrix composite. **International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research**, v. 2, n. 2, p. 106–124, 2013.

SI, S.; ZHENG, X.; LI, X. Effect of carbonization treatment on the physicochemical properties of bamboo particleboard. **Construction and Building Materials**, v. 344, p. 128204, 2022.

SILVA, F. J. C. **Caracterização de Resinas de Ureia-Formaldeído**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

SORATTO, D. N. *et al.* Efeitos da adição de cavaco com casca na qualidade de painéis MDP produzidos com *Eucalyptus* spp. **Revista Ciência da Madeira**, v. 4, n. 1, p. 46–59, 2013.

SOUZA, J. L. *et al.* Efeito do teor de cobalto na sinterização do compósito cerâmico Al₂O₃ - CO. **Holos**, v. 1, p. 13–20, 2015.

SOUZA, M. J. C. *et al.* Eco-friendly particleboard production from coconut waste valorization. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 15241–15252, 2023.

SOZIM, P. C. L. *et al.* Propriedades de painéis aglomerados produzidos com

madeiras de *Ligustrum lucidum* e *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 39, n. 1, p. 201801696, 2019.

ŠPANIĆ, N. *et al.* Mechanical properties and free formaldehyde content of particleboards produced using ammonium sulphate-based hardener partially replaced with tartaric acid. **Drvna industrija**, v. 71, n. 4, p. 389–393, 2020.

SRIVABUT, C.; RATANAWILAI, T.; HIZIROGLU, S. Effect of nanoclay, talcum, and calcium carbonate as filler on properties of composites manufactured from recycled polypropylene and rubberwood fiber. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 450–458, 2018.

STANGE, R. *et al.* Production of particleboard panels from wood of *Ochroma pyramidale*. **Floresta**, v. 54, n. 1, p. 1–10, 2024.

STARK, N. M.; CAI, Z. Wood-Based Composite Materials: Panel products, glued laminated timber, structural composite lumber, and wood non-wood composites. In: **Wood Handbook - Wood as an engineering material**. Madison, WI: General Technical Report FPL-GTR-282, 2021. p. 11-2-11–29.

SU, J.; ZHENG, L.; DENG, Z. Study on acoustic properties at normal incidence of three-multilayer composite made of glass wool, glue and polyurethane foam. **Applied Acoustics**, v. 156, p. 319–326, 2019.

SUGAHARA, E. S. **Painéis aglomerados produzidos com partículas de Eucalipto e bagaço de cana, com adesivos ureia formaldeído e poliuretano à base de mamona**. 2018. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2018.

SULAIMAN, N. S. *et al.* Partial replacement of urea-formaldehyde with modified oil palm starch based adhesive to fabricate particleboard. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 84, p. 1–8, 2018.

SVENSSON, I. *et al.* Bio-based phosphate-containing polyester for improvement of fire reaction in wooden particleboard. **Polymers**, v. 15, n. 5, p. 1–19, 2023.

TAGHIYARI, H. R. *et al.* The effect of silver and copper nanoparticles as resin fillers on less-studied properties of UF-based particleboards. **Wood Material Science &**

Engineering, v. 17, n. 5, p. 317–327, 2022.

TAGHIYARI, H. R.; TAHERI, A.; OMRANI, P. Correlation between acoustic and physical–mechanical properties of insulating composite boards made from sunflower stalk and wood chips. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 75, n. 3, p. 409–418, 2017.

TAPPI. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **Test methods T 264 om-88**: Preparation of wood for chemical analysis. Atlanta, USA. 2001.

TAQUETTI, V. B. *et al.* Performance of eucalypt particleboard with the addition of farm waste. **Heliyon**, v. 9, n. 12, p. 22760, 2023.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**. 2006. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita”, Ilha Solteira, 2006.

TIAN, H. *et al.* Adhesion properties and formaldehyde emissions of MnO₂/UF nanocomposite adhesives. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 128, p. 103527, 2024.

TINTI, V. P. **Efeitos da temperatura e adesivos na qualidade de painéis aglomerados produzidos com resíduos de madeira de eucalipto**. 2015. 79f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2015.

TORUN, S. B. Investigation of the properties of fiberboards made from microcrystalline cellulose and antimony trioxide added melamine formaldehyde adhesive. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 113, p. 103084, 2022.

TREVISAN, R. *et al.* Idade de segregação do lenho juvenil e adulto para *Pinus elliottii* Engel. **Ciencia Rural**, v. 44, n. 4, p. 634–638, 2014.

TRIANOSKI, R. **Avaliação da qualidade da madeira de espécies de pinus tropicais por meio de métodos convencionais e não destrutivos**. 2012. 554f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná,

Curitiba, 2012.

TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. Avaliação de painéis aglomerados de *Toona ciliata* produzidos com diferentes densidades e teores de resina. **Madera y Bosques**, v. 20, p. 49–58, 2014.

TSUKAMOTO, M. *et al.* Evaluation of the tensile strength of polypropylene-based composites containing glass wool. **Materials Letters**, v. 132, p. 267–269, 2014.

ULKER, O. Surface roughness of composite panels as a quality control tool. **Materials**, v. 11, n. 3, p. 1–10, 2018.

ÜLKER, O.; BURDURLU, E. Effect of glass wool and stone wool additives on some mechanical properties of wood composites. **BioResources**, v. 11, n. 3, p. 5974–5986, 2016.

VASQUEZ, A. G. *et al.* Uma síntese da contribuição do gênero *Pinus* para o desenvolvimento sustentável no sul do Brasil. **Floresta**, v. 37, n. 3, p. 445–450, 2007.

VASUDEVAN, J. N. A. **Development of coating for formaldehyde scavengers in wood composite**. 2015. 65f. Thesis (Bachelor of Chemical Engineering) - Faculty of Chemical & Natural Resources Engineering - Universiti Malaysia Pahang, Pahang, 2015.

VEIGEL, S. *et al.* Cellulose nanofibrils as filler for adhesives: Effect on specific fracture energy of solid wood-adhesive bonds. **Cellulose**, v. 18, n. 5, p. 1227–1237, 2011.

VICK, C. B. Adhesive Bonding of Wood Materials. In: **Wood Handbook - Wood as an Engineering Material**. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. p. 9-1-9–24.

VIGNA, S. A. M. *et al.* Propriedades mecânicas de Painéis de partículas produzidos com madeira de *Muntingia calabura* L. In: Gonçalves, F. G. *et al.* (Eds.) **Madeira de Calabura: da ciência básica ao uso madeireiro**. 1. ed. Científica Digital, 2024. p. 115–134.

WAKE, W. C. Theories of adhesion and uses of adhesives: a review. **Polymer**, v. 19,

n. 3, p. 291–308, 1977.

WALKER, J. G. F. *et al.* **Primary Wood: Principles and practice**. 1. ed. London: Chapman & Hall, 1993.

WANG, H. *et al.* Technological properties of a branched polyethyleneimine derivative as a cross-linker for low molar ratio urea-formaldehyde resins. **Polymer Testing**, v. 118, p. 107914, 2023.

WANG, K. **Robot-based research on three-layer oriented flakeboards**. 1997. 120f. Thesis (Master of Science) - University of British Columbia, Vancouver, 1997.

WANG, S. Y. *et al.* Properties of low-formaldehyde-emission particleboard made from recycled wood-waste chips sprayed with PMDI/PF resin. **Building and Environment**, v. 42, n. 7, p. 2472–2479, 2007.

WATSON, A. S. G. **O Brasil e as restrições às exportações**. Brasília: Fundação Alexandre de Gusmão, 2016.

WEBER, C. **Estudo sobre viabilidade de uso de resíduos de compensados MDF e MDP para produção de painéis aglomerados**. 2011. 87f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2011.

WONG, E. D. *et al.* Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard. **Wood Science and Technology**, v. 33, n. 4, p. 327–340, 1999.

WONG, M. C. *et al.* Grapevine waste in sustainable hybrid particleboard production. **Waste Management**, v. 118, p. 501–509, 2020.

WRONKA, A.; KOWALUK, G. Upcycling different particle sizes and contents of Pine branches into particleboard. **Polymers**, v. 14, n. 21, p. 4559, 2022.

YADAV, R. Guanyl urea phosphate-based adhesive for fire-retardant particleboard. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 21, n. 1, p. 83–87, 2024.

YANG, Y. *et al.* Processing technique and uniformity affecting tensile strength and hydrophobicity properties of glass wool felt. **Fibers and Polymers**, v. 16, n. 7, p. 1587–1594, 2015.

YLINIEMI, J. *et al.* Nanostructural evolution of alkali-activated mineral wools. **Cement**

and Concrete Composites, v. 106, p. 103472, 2020.

YOUNESI-KORDKHEILI, H. Reduction of formaldehyde emission from urea-formaldehyde resin by maleated nanolignin. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 132, p. 103677. 2024.

YOUNESI-KORDKHEILI, H.; PIZZI, A. Acid ionic liquids as a new hardener in urea-glyoxal adhesive resins. **Polymers**, v. 8, n. 3, p. 2–14, 2016.

ZATLOUKAL, P.; DOSKOČIL, T.; TIPPNER, J. Acoustic Properties of Wood-Based and Non-Wood-Based Materials for Piano-Case Making. **Drvna industrija**, v. 75, n. 2, p. 227–236, 2024.

ZHANG, L. *et al.* Development of plant oil-based adhesives for formaldehyde-free bamboo particleboards. **Industrial Crops and Products**, v. 210, p. 118146, 2024.

ZHANG, X. *et al.* Development of a strong and conductive soy protein adhesive by building a hybrid structure based on multifunctional wood composite materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 412, p. 137461, 2023.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Análises de variância para as propriedades tecnológicas dos adesivos.

APÊNDICE A1 – Análise de variância do pH de adesivos ureia-formaldeído em função do teor de lã de vidro como material de enchimento.

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE					MG = 8.25333	CV% = 1.40
FV	GL	SQ	QM	F	Ponto médio = 8.36500	
Tratamentos	5	1.31083	0.26217	19.5378 **	Normalidade dos dados (alfa = 5%)	
Resíduo	24	0.32204	0.01342		-----	
Total	29	1.63287			Teste (Estatística)	Valor p-valor Normal
					Shapiro-Wilk (W)	0.92981 0.04853 Não

					Dados	

					7.95	8.00 7.87 7.89 7.86
					8.28	8.20 8.20 8.18 8.15
					8.19	8.00 8.23 8.08 8.24
					8.34	8.25 8.34 8.29 8.23
					8.48	8.33 8.31 8.31 8.41
					8.87	8.84 8.42 8.40 8.46

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
5	24	3.8951	19.5378	<.0001

APÊNDICE A2 – Análise de variância do teor de sólidos de adesivos ureia-formaldeído em função do teor de lã de vidro como material de enchimento

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE					MG = 67.12067	CV% = 2.24
FV	GL	SQ	QM	F	Ponto médio = 67.67000	
Tratamentos	5	274.03891	54.80778	24.3210 **	Normalidade dos dados (alfa = 5%)	
Resíduo	24	54.08448	2.25352		-----	
Total	29	328.12339			Teste (Estatística)	Valor p-valor Normal
					Shapiro-Wilk (W)	0.93754 0.07810 Sim

					Dados	

					67.93	61.79 60.93 62.03 61.72
					67.90	66.88 66.46 68.48 67.36
					62.65	64.66 63.98 63.89 63.81
					68.32	67.96 68.26 67.80 68.38
					68.42	68.38 69.14 69.06 68.19
					72.60	74.41 69.79 69.86 72.58

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
5	24	3.8951	24.321	<.0001

APÊNDICE A3 – Análise de variância da viscosidade de adesivos ureia-formaldeído em função do teor de lã de vidro como material de enchimento.

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE					MG = 2630.16000	CV% = 15.56
FV	GL	SQ	QM	F	Ponto médio = 5363.55000	
Tratamentos	5	173409262.5720	34681852.5144	207.1610 *	Normalidade dos dados (alfa = 5%)	
Resíduo	24	4017959.92000	167414.99667		Teste (Estatística) Valor p-valor Normal	
Total	29	177427222.4920			Shapiro-Wilk (W) 0.58621 0.00000 Não	
					Dados	
					1190.1	1162.3
					1300.7	1209.7
					1732.5	1705.2
					1750.4	1639.1
					1835.6	1964.8
					7346.9	7082.6
					1122.2	1103.3
					1329.7	1328.7
					1692.7	1597.5
					1785.4	1745.8
					1978.4	1971.0
					8019.4	9623.8
					1132.0	1275.6
					1631.9	1815.6
					1815.6	2051.0
					7780.9	

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
5	24	3.8951	207.161	<.0001

APÊNDICE A4 – Análise de variância do tempo de gel de adesivos ureia-formaldeído em função do teor de lã de vidro como material de enchimento.

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE					MG = 83.66667	CV% = 12.84
FV	GL	SQ	QM	F	Ponto médio = 87.50000	
Tratamentos	5	6995.46667	1399.09333	12.1169 **	Normalidade dos dados (alfa = 5%)	
Resíduo	24	2771.20000	115.46667		Teste (Estatística) Valor p-valor Normal	
Total	29	9766.66667			Shapiro-Wilk (W) 0.94218 0.10411 Sim	
					Dados	
					107	76
					77	74
					105	86
					65	65
					79	81
					100	95
					73	84
					54	64
					102	82
					72	71
					59	82
					120	120
					121	

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
5	24	3.8951	12.1169	<.0001

APÊNDICE B – Análises estatísticas para as propriedades físicas dos painéis aglomerados.

APÊNDICE B1 – Análise de variância da densidade dos painéis aglomerados em função do teor de lã de vidro no adesivo ureia-formaldeído.

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE					GL	GLR	F-crit	F	p
FV	GL	SQ	QM	F	5	66	0.1634	0.5682	0.724
Tratamentos	5	2406.79707	481.35941	0.5682 ns	MG = 723.89308		CV% = 4.02		
Resíduo	66	55916.22837	847.21558		Ponto médio = 715.65000				
Total	71	58323.02544			Normalidade dos dados (alfa = 5%)				
** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)					Teste (Estatística) Valor p-valor Normal				
* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)					Shapiro-Wilk (W) 0.98604 0.61045 Sim				
ns não significativo ($p \geq .05$)									

APÊNDICE B2 – Análise de regressão linear das densidades médias máximas em relação às densidades médias dos painéis aglomerados.

RESUMO DOS RESULTADOS

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,935887488
R-Quadrado	0,875885391
R-quadrado ajustado	0,874112325
Erro padrão	10,98546167
Observações	72

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	59615,47984	59615,48	493,9948	1,9479E-33
Resíduo	70	8447,625772	120,6804		
Total	71	68063,10561			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	95,78005446	32,95399258	2,906478	0,004891	30,05538868	161,5047202	30,05538868	161,5047202
Variável X 1	1,01101921	0,045488142	22,22599	1,95E-33	0,920295971	1,101742449	0,920295971	1,101742449

APÊNDICE B3 – Análise de regressão linear das densidades médias mínimas em relação às densidades médias dos painéis aglomerados.

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,970874043
R-Quadrado	0,942596408
R-quadrado ajustado	0,941776357
Erro padrão	6,769220708
Observações	72

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	52669,85257	52669,85	1149,436	3,57419E-45
Resíduo	70	3207,564429	45,82235		
Total	71	55877,417			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-41,61242585	20,3061879	-2,04925	0,044187	-82,1118406	-1,113011095	-82,1118406	-1,113011095
Variável X 1	0,950300454	0,028029707	33,90333	3,57E-45	0,894396966	1,006203942	0,894396966	1,006203942

APÊNDICE B4 – Análise de regressão linear da razão de compactação dos painéis aglomerados com base no teor de lã de vidro no adesivo ureia-formaldeído.

REGRESSÃO NA ANÁLISE DE VARIÂNCIA - INT.CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Reg. linear	1	0.06266	0.06266	22.4829 **
Tratamentos	5	0.06821	0.01364	4.8948 --
Resíduo	66	0.18395	0.00279	
Total	71	0.25216		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 = p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
1	66	7.036	22.4829	<.0001

Eq. de regressão: $y = a + b.x + c.x^2 + d.x^3 + e.x^4 + f.x^5$
 x = Tratamentos y = Médias dos tratamentos

a = 1.35608516
 b = - 0.04426818

Coefficiente de correlação: $r = 0.93798815$
 Coeficiente de determinação: $R^2 = 0.87982177$

Trat.	nível	Médias de trat.	Médias estimadas
1	0.00000	1.36677	1.35609
2	0.50000	1.33869	1.33395
3	0.75000	1.31009	1.32288
4	1.00000	1.30446	1.31182
5	1.50000	1.27945	1.28968
6	2.00000	1.28252	1.26755
Médias	0.95833	1.31366	1.31366

MG = 1.31366 CV% = 4.02
 Ponto médio = 1.31121

APÊNDICE B5 – Análise de regressão linear da absorção de água em painéis aglomerados com base no teor de lã de vidro no adesivo ureia-formaldeído.

REGRESSÃO NA ANÁLISE DE VARIÂNCIA - INT.CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Reg.linear	1	848.41914	848.41914	24.7519 **
Tratamentos	5	967.77473	193.55495	5.6468 --
Resíduo	60	2056.61476	34.27691	
Total	65	3024.38948		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 = p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
1	60	7.0771	24.7519	<.0001

Eq. de regressão: $y = a + b.x$
 $x =$ Tratamentos $y =$ Médias dos tratamentos

a = 55.34774737
 b = 0.88616865

Coefficiente de correlação: $r = 0.93014092$
 Coeficiente de determinação: $R^2 = 0.86516213$

Tratamento	nível	Médias de trat.	Médias estimadas
1	0.00000	57.53862	55.34775
2	3.34000	56.63069	58.30755
3	4.93000	58.24679	59.71656
4	6.52000	60.39973	61.12557
5	9.49000	64.87235	63.75749
6	12.35000	66.85866	66.29193
Médias	6.10500	60.75781	60.75781

MG = 60.75781 CV% = 9.64
 Ponto médio = 62.05797

APÊNDICE B6 – Análise de regressão linear do inchamento em espessura em painéis aglomerados com base no teor de lã de vidro no adesivo ureia-formaldeído.

REGRESSÃO NA ANÁLISE DE VARIÂNCIA - INT.CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Reg.linear	1	55.94144	55.94144	31.3157 **
Tratamentos	5	72.26065	14.45213	8.0902 --
Resíduo	48	85.74590	1.78637	
Total	53	158.00655		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 = p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
1	48	7.1956	31.3157	<.0001

$y = a + b.x$

EQUAÇÃO DE GRAU 1
 a = 14.926669832980463353988517977
 b = .2435724785969423833397380184

$r = .84629488$
 $R^2 = .716215023914214$

Tratamento	nível	Médias de trat.	Médias estimadas
1	0.00000	15.79978	15.73524
2	3.34000	14.60914	14.98742
3	4.93000	15.87554	15.55319
4	6.52000	16.53392	16.39007
5	9.49000	17.64576	17.86225
6	12.35000	18.01794	17.95390
Médias	6.10500	16.41368	16.41368

MG = 16.41368 CV% = 8.14
 Ponto médio = 16.49058

APÊNDICE C – Análises de variância para as propriedades mecânicas dos painéis aglomerados.

APÊNDICE C1 – Análise de variância do módulo de elasticidade a flexão estática (FE_{moe}) dos painéis aglomerados em função do teor de lã de vidro no adesivo ureia-formaldeído.

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE					GL	GLR	F-crit	F	p
FV	GL	SQ	QM	F	5	72	2.3422	2.9764	0.0169
Tratamentos	5	1584975.57621	316995.11524	2.9764 *	MG = 2344.29045		CV% = 13.92		
Resíduo	72	7668131.89662	106501.83190		Ponto médio = 2150.08650				
Total	77	9253107.47283			Normalidade dos dados (alfa = 5%)				
					Teste (Estatística) Valor p-valor Normal				
					Shapiro-Wilk (W) 0.98591 0.54742 Sim				

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

APÊNDICE C2 – Análise de variância do módulo de ruptura a flexão estática (FE_{mor}) dos painéis aglomerados em função do teor de lã de vidro no adesivo ureia-formaldeído.

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE					GL	GLR	F-crit	F	p
FV	GL	SQ	QM	F	5	78	3.2626	4.168	0.002
Tratamentos	5	140.83841	28.16768	4.1680 **	MG = 15.75308		CV% = 16.50		
Resíduo	78	527.12758	6.75805		Ponto médio = 16.32866				
Total	83	667.96599			Normalidade dos dados (alfa = 5%)				
					Teste (Estatística) Valor p-valor Normal				
					Shapiro-Wilk (W) 0.98999 0.76926 Sim				

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

APÊNDICE C3 – Análise de variância da resistência de ligação interna dos painéis aglomerados em função do teor de lã de vidro no adesivo ureia-formaldeído.

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE					GL	GLR	F-crit	F	p
FV	GL	SQ	QM	F	5	54	3.3778	12.5532	<.0001
Tratamentos	5	0.68751	0.13750	12.5532 **	MG = 0.78619		CV% = 13.31		
Resíduo	54	0.59149	0.01095		Ponto médio = 0.83360				
Total	59	1.27900			Normalidade dos dados (alfa = 5%)				

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

Teste (Estatística)	Valor	p-valor	Normal
Shapiro-Wilk (W)	0.93620	0.00367	Não

APÊNDICE C4 – Análise de regressão linear da dureza Janka em painéis aglomerados com base no teor de lã de vidro adicionado ao adesivo ureia-formaldeído.

REGRESSÃO NA ANÁLISE DE VARIÂNCIA - INT.CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE				
FV	GL	SQ	QM	F
Reg.linear	1	904.99224	904.99224	7.6555 **
Tratamentos	5	1519.25604	303.85121	2.5703 --
Resíduo	60	7092.85703	118.21428	
Total	65	8612.11307		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

Tratamento	nível	Médias de trat.	Médias estimadas
1	0.00000	47.48371	48.56273
2	3.34000	55.34714	51.81594
3	4.93000	52.46745	53.36462
4	6.52000	55.24016	54.91330
5	9.49000	53.00238	57.80613
6	12.35000	63.51370	60.59181
Médias	6.10500	54.50909	54.50909

GL	GLR	F-crit	F	p
1	60	7.0771	7.6555	0.0075

Eq. de regressão: $y = a + b.x + c.x^2 + d.x^3 + e.x^4 + f.x^5$
 x = Tratamentos y = Médias dos tratamentos

a = 48.56273329
 b = 0.97401405

MG = 54.50909 CV% = 19.95
 Ponto médio = 51.92807

APÊNDICE C5 – Análise de variância da resistência ao arrancamento de parafuso (face) dos painéis aglomerados em função do teor de lã de vidro no adesivo ureia-formaldeído.

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE					MG = 126.20741	CV% = 10.02							
FV	GL	SQ	QM	F	Ponto médio = 124.70000								
Tratamentos	5	4166.30148	833.26030	5.2132 **	Normalidade dos dados (alfa = 5%)								
Resíduo	48	7672.15556	159.83657		Teste (Estatística) Valor p-valor Normal								
Total	53	11838.45704			Shapiro-Wilk (W) 0.98039 0.51723 Sim								
					Dados								
** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)					98.5	107.5	139.1	108.1	142.5	132.7	128.9	142.8	116.6
* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)					147.4	135.6	143.5	134.3	155.8	136.7	141.5	142.6	150.8
ns não significativo (p >= .05)					132.1	93.6	110.8	131.9	100.1	124.6	134.0	104.6	151.7
GL	GLR	F-crit	F	p	107.8	135.4	124.7	123.2	107.7	127.1	113.8	125.2	128.7
5	48	3.4264	5.2132	0.0006	109.5	116.3	108.9	118.5	124.7	125.8	116.4	117.8	113.0
					140.1	117.7	134.0	144.5	144.3	132.4	135.3	113.6	120.5

APÊNDICE D – Análise de variância da resistência dos painéis aglomerados ao teste de inflamabilidade em função do teor de lã de vidro no adesivo ureia-formaldeído.

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE					GL	GLR	F-crit	F	p
FV	GL	SQ	QM	F	5	72	3.2838	8.0213	<.0001
Tratamentos	5	121704585.0769	24340917.0154	8.0213 **	MG = 7589.76923		CV% = 22.95		
Resíduo	72	218486236.7692	3034531.06624		Ponto médio = 7059.00000		Normalidade dos dados (alfa = 5%)		
Total	77	340190821.8462					Teste (Estatística) Valor p-valor Normal		
							Shapiro-Wilk (W) 0.97246 0.08892 Sim		
** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)									
* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)									
ns não significativo (p >= .05)									

APÊNDICE E – Análises de variância para as propriedades acústicas dos painéis aglomerados.

APÊNDICE E1 – Análise de variância do isolamento acústico por impacto dos painéis aglomerados em função do teor de lã de vidro no adesivo ureia-formaldeído.

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE					GL	GLR	F-crit	F	p
FV	GL	SQ	QM	F	5	66	3.3088	4.7765	0.0008
Tratamentos	5	11.24111	2.24822	4.7765 **	MG = 101.71389		CV% = 0.67		
Resíduo	66	31.06500	0.47068		Ponto médio = 101.65000				
Total	71	42.30611			Normalidade dos dados (alfa = 5%)				
** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)					Teste (Estatística) Valor p-valor Normal				
* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)					Shapiro-Wilk (W) 0.96954 0.07795 Sim				
ns não significativo ($p \geq .05$)									

APÊNDICE E2 – Análise de variância do fator de amortecimento (Df) dos painéis aglomerados em função do teor de lã de vidro no adesivo ureia-formaldeído.

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE					GL	GLR	F-crit	F	p
FV	GL	SQ	QM	F	5	48	3.4264	8.7887	<.0001
Tratamentos	5	0.00013	0.00003	8.7887 **	MG = 0.08638		CV% = 2.02		
Resíduo	48	0.00015	0.00000		Ponto médio = 0.08647				
Total	53	0.00028			Normalidade dos dados (alfa = 5%)				
** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)					Teste (Estatística) Valor p-valor Normal				
* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)					Shapiro-Wilk (W) 0.94896 0.02242 Não				
ns não significativo ($p \geq .05$)									

APÊNDICE E3 – Análise de variância da eficiência de conversão acústica dos painéis aglomerados em função do teor de lã de vidro no adesivo ureia-formaldeído.

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE					GL	GLR	F-crit	F	p
FV	GL	SQ	QM	F	5	48	3.4264	7.1924	<.0001
Tratamentos	5	1270.52500	254.10500	7.1924 **	MG = 155.43227				CV% = 3.82
Resíduo	48	1695.81950	35.32957		Ponto médio = 157.14930				
Total	53	2966.34450			Normalidade dos dados (alfa = 5%)				
** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)					Teste (Estatística) Valor p-valor Normal				
* significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)					Shapiro-Wilk (W) 0.95495 0.04103 Não				
ns não significativo (p >= .05)									