



VICTOR GUIMARÃES ARANTES

**CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS COMPENSADOS DE *Pinus*
sp.: ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS
COM ADESIVO POLIURETANO**

LAVRAS - MG

2023

VICTOR GUIMARÃES ARANTES

**CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS COMPENSADOS DE *Pinus sp.*: ANÁLISE DAS
PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS COM ADESIVO POLIURETANO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do
Curso de Engenharia Florestal, para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Florestal.

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes
Orientador

Dr. Douglas Lamounier Faria
Coorientador

**LAVRAS - MG
2023**

RESUMO

No contexto industrial da produção de painéis compensados de madeira, a escolha do adesivo adequado desempenha um papel determinante na garantia da qualidade e durabilidade dos painéis. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas de painéis compensados produzidos com madeira de *Pinus sp.* e adesivo poliuretano em diferentes gramaturas. Ao contrário dos adesivos fenólicos tradicionais, o poliuretano tem se destacado devido às suas propriedades superiores de adesão, resistência à umidade e maior durabilidade, além de não emitir formaldeído. Foram produzidos painéis compensados compostos por cinco lâminas de 2 mm de espessura, utilizando diferentes gramaturas de adesivo poliuretano (240, 280 e 320 g/m²). Os painéis foram submetidos a testes físicos, incluindo avaliação de umidade, densidade aparente e absorção de água, e a testes mecânicos, como flexão estática nas posições *flatwise* e *edgewise* e resistência ao cisalhamento, além de análise de epifluorescência da linha de cola. Os resultados observados revelaram que a redução da gramatura não afetou a resistência ao cisalhamento, sendo verificados na condição seca valores de 1,34 MPa para a gramatura de 240 g/m² e 1,63 MPa para a gramatura de 320 g/m². Concluiu-se baseado nos resultados deste estudo que o adesivo poliuretano se mostra como uma alternativa viável para a indústria de painéis de madeira.

Palavras-chave: Caracterização de painéis, gramaturas, epifluorescência, qualidade da linha de cola, adesivo alternativo

ABSTRACT

In the industrial context of wood veneer plywood production, the selection of the appropriate adhesive plays a crucial role in ensuring the quality and durability of the panels. In this regard, this study aimed to assess the physical and mechanical properties of plywood panels manufactured with Pinus sp. wood and polyurethane adhesive at different weight per unit areas. Unlike traditional phenolic adhesives, polyurethane has stood out due to its superior properties of adhesion, moisture resistance, increased durability, and the absence of formaldehyde emission. Plywood panels composed of five layers with a thickness of 2 mm each were produced, using varying weights of polyurethane adhesive (240, 280, and 320 g/m²). The panels underwent physical tests, including moisture evaluation, apparent density, and water absorption, as well as mechanical tests such as static bending in flatwise and edgewise positions, shear strength, and analysis of adhesive line epifluorescence. The observed results revealed that the reduction in weight per unit area did not affect shear strength, with dry condition values of 1.34 MPa for 240 g/m² and 1.63 MPa for 320 g/m² weight per unit area. Based on the results of this study, it has been concluded that polyurethane adhesive proves to be a viable alternative for the wood panel industry.

Keywords: Plywood characterization, grammage, epifluorescence, quality, alternative

LISTA DE FIGURAS

SEGUNDA PARTE - ARTIGO

Figura 1 - Produção dos painéis de madeira compensados	25
Figura 2 - Resistência ao cisalhamento	27
Figura 3 - Posições dos testes de flexão estática	28
Figura 4 - Linhas de cola e adesivos em evidência por epifluorescência	33
Figura 5 - Ajustes de modelos polinomiais relacionando a espessura da linha de cola e módulos de elasticidade e ruptura dos painéis compensados.....	35

LISTA DE TABELAS

SEGUNDA PARTE - ARTIGO

Tabela 1 - Delineamento experimental utilizado.	26
Tabela 2 - Resultados observados para as propriedades físicas dos painéis compensados. ...	29
Tabela 3 - Resultados dos ensaios de cisalhamento nas condições seco, úmido e pós-fervura.	31
Tabela 4 - Resultados dos ensaios mecânicos de Flexão Estática dos painéis de madeira avaliando Módulo de Ruptura (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE).....	32
Tabela 5 - Espessuras de linhas de cola para as diferentes composições estudadas.....	33

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO	7
2 OBJETIVOS	9
2.1 Objetivo geral.....	9
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
3.1 Visão geral do setor florestal	10
3.2 Painéis compensados de madeira	11
3.3 Madeira de pinus.	13
3.4 Adesivos	14
3.5 Linha de cola	15
4 CONCLUSÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
REFERÊNCIAS	17
SEGUNDA PARTE - ARTIGO	21

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

A criação de novas opções produtivas com maior valor agregado por meio da diversificação de produtos madeireiros é de grande relevância no contexto comercial e industrial. Isso levou ao surgimento de uma geração de produtos da madeira conhecidos genericamente como "produtos confeccionados à base de madeira" (FARIA et al., 2020). Esses produtos passam por um processo de transformação em que a madeira é reduzida a frações ou componentes mais elementares ou convenientes por meio de processos industriais, com o objetivo de obter um melhor desempenho estrutural.

Os painéis compensados de madeira são um desses produtos industrializados que ganhou grande popularidade e aplicação em diversas indústrias. De acordo com Iwakiri et al. (2020), o compensado, também conhecido como madeira compensada, é um tipo de painel composto por lâminas de madeira que são sobrepostas em camadas ímpares e coladas umas às outras, de forma que a direção das grãs das camadas adjacentes formem um ângulo de 90 graus entre si com adesivos para criar um painel com distribuição uniforme de resistência e diversificados potenciais de uso. Segundo Shimizu (2008), os compensados de pinus se destacam como um dos produtos de madeira sólida mais competitivos no mercado internacional. As propriedades mecânicas e físicas dos painéis compensados de madeira são influenciadas pela espécie de madeira selecionada, tipo de adesivo utilizado, número, espessura e orientação das camadas, apresentando em geral características desejáveis.

De acordo com o relatório de 2022 da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2022), os painéis compensados de pinus obtiveram alta de 22% no volume comercializado com o exterior entre o período do primeiro trimestre de 2020 a 2021, alcançando 608 mil m³, atingindo um total de 2,6 milhões de m³ no total exportado do ano, representando uma alta de 4% em relação ao ano anterior.

Atualmente o Brasil figura entre um dos maiores produtores de painéis compensados fabricados com madeiras de espécies coníferas, produzindo 3,4 milhões de m³ estimados (MODES et al., 2023). No caso de painéis fabricados com adesivos que contenham formaldeído, uma das desvantagens desse tipos de adesivos são as emissões de formaldeído livre, substância potencialmente carcinogênica, caso haja exposição a concentrações superiores a 0,1 ppm. (BUDDI et al., 2016; PAULA et al., 2020).

Estudos como os de Cremonoz et al. (2019) se concentraram na diversificação de densidade de madeiras, onde foram experimentados diferentes tratamentos silviculturais para eucalipto e o trabalho de Goulart et al. (2023) sobre a resistência ao cisalhamento produzindo painéis com adesivo à base de taninos de barbatimão. Além disso, Magalhães et al. (2019) investigaram composições de adesivos mistos com resinas fenólicas e lignina Kraft, enquanto Galdino (2020) analisou as propriedades físicas de painéis compensados fabricados com adesivo de poliuretano e tratados com termorretificação. Em contraste com estas pesquisas, este estudo tem como objetivo avaliar as propriedades físicas, mecânicas e a linha de cola de painéis compensados produzidos com diferentes gramaturas de adesivo poliuretano.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar as propriedades físicas, mecânicas e a linha de cola de painéis compensados fabricados com adesivo poliuretano em diferentes gramaturas.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Visão geral do setor florestal

A fabricação de painéis compensados de madeira, painéis aglomerados e outros produtos similares é uma prática consolidada no setor florestal, e a escolha dos adesivos desempenha um papel fundamental na determinação das propriedades finais desses produtos. A substituição de adesivos convencionais como uréia formaldeído por poliuretanos destaca-se como uma estratégia promissora (ATHANÁZIO-HELIDORO et al., 2018; SUGAHARA, 2018).

A análise dos estudos abordados também se estende à incorporação de materiais alternativos na produção de painéis, como o bagaço de cana (BUZO, 2018) e o polietileno tereftalato proveniente de resíduos de movelaria (HERRADON, 2023), evidenciando uma tendência de busca por materiais sustentáveis e de reutilização na indústria florestal. Além disso, a diversificação das fontes de madeira utilizadas, como o pinus, eucalipto, seringueira e madeira clonal de *Eucalyptus urophylla*, demonstra a adaptabilidade desses adesivos em diferentes contextos e matrizes madeireiras (GILIO, 2020; TREVISAN, 2021; SILVA et al., 2023). Essa variedade de fontes contribui para a mitigação dos impactos ambientais associados à exploração de uma única espécie, promovendo a gestão sustentável dos recursos florestais.

Atualmente, o setor florestal encontra-se em um cenário dinâmico e em constante evolução, impulsionado por uma série de fatores que refletem não apenas demandas de mercado, mas também uma crescente conscientização ambiental. A utilização de adesivos poliuretanos, conforme evidenciado por diversos estudos, destaca-se como uma resposta inovadora às pressões por práticas mais sustentáveis na indústria (MÖLLEKEN et al., 2017; ATHANÁZIO-HELIDORO et al., 2018; SUGAHARA, 2018). A busca por alternativas sustentáveis é uma tônica crescente no setor, sendo que tal tendência está alinhada com as demandas do mercado global, que cada vez mais valoriza produtos provenientes de fontes renováveis e processos produtivos que minimizem o impacto ambiental. Nesse sentido, as pesquisas de Carvalho (2023) e Biazzon (2018) atestam a crescente importância da adoção de adesivos poliuretanos na produção de painéis, proporcionando não apenas benefícios ambientais, mas também vantagens competitivas no mercado.

O setor florestal contemporâneo está imerso em um contexto de mudanças e adaptações, onde a busca por práticas sustentáveis, inovações tecnológicas e a diversificação de fontes de matéria-prima são aspectos importantes para a produção de produtos adequados

com a evolução presente na sociedade. A adoção de adesivos poliuretanos derivados do óleo de mamona, aliada à incorporação de materiais alternativos e à avaliação minuciosa das propriedades dos produtos, posiciona o setor como um agente de transformação, alinhado às demandas de um mundo cada vez mais preocupado com a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental. Essa abordagem reflete não apenas uma resposta às atuais exigências do mercado, mas também um comprometimento com práticas que promovam a preservação dos recursos naturais e a construção de uma indústria florestal mais resiliente e sustentável.

3.2 Painéis compensados de madeira

Os painéis compensados de madeira têm uma história que remonta séculos, sendo utilizados por povos da antiguidade, como os romanos. O desenvolvimento inicial desses painéis foi impulsionado pela necessidade de materiais mais estáveis e uniformes para diversas aplicações, incluindo construção e fabricação de móveis. Ao longo do tempo, os avanços tecnológicos e a busca por materiais mais sustentáveis contribuíram para a evolução contínua dessa técnica de produção (ATHANÁZIO-HELIODORO et al., 2018).

Os painéis compensados de madeira consistem em camadas ou lâminas de madeira, conhecidas como folheados, que são coladas entre si em orientações alternadas. Essa configuração cruzada confere ao compensado uma resistência e estabilidade dimensional superiores em comparação com a madeira maciça. Esses painéis oferecem uma combinação única de propriedades, incluindo leveza, resistência mecânica e versatilidade em diferentes aplicações, possuindo vantagens em relação à madeira maciça, principalmente devido à sua estrutura e processo de fabricação (SUGAHARA, 2018). A madeira compensada é formada por lâminas de madeira finas sobrepostas e unidas por um adesivo resistente. Essa estrutura proporciona uma equivalência nas propriedades elásticas e de resistência nas principais direções da chapa, como largura e comprimento. Além disso, a prensagem em alta pressão dessas lâminas garante boa resistência mecânica ao material. A madeira compensada também é reconhecida por sua versatilidade, podendo ser utilizada estruturalmente de diversas maneiras (PIZZOL et al., 2017).

O processo produtivo dos painéis compensados envolve várias etapas, desde a seleção da matéria-prima até a prensagem final. Inicialmente, as lâminas de madeira são preparadas, geralmente através de descascamento ou serragem, e em seguida são coladas com adesivos apropriados. Quanto à classificação, os compensados podem ser categorizados com base na qualidade das lâminas, método de produção e aplicação específica, abrangendo desde painéis estruturais até os destinados à fabricação de móveis (BIAZZON, 2018).

No período de 2012 a 2022 houve um aumento de cerca de 16,5% na produção mundial de painéis compensados, com valor de aproximadamente 110,7 milhões de m³ em 2012 a 128,9 milhões de m³, com o Brasil na posição de sétimo país com maior produção total acumulada no período, totalizando 31,2 milhões de m³ produzidos (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAOSTAT, 2023).

Diversos fatores impactam as propriedades dos painéis compensados. A escolha da espécie de madeira, bem como a qualidade das lâminas utilizadas, desempenha um papel significativo na resistência e durabilidade do produto final (GILIO, 2020). O tipo de adesivo empregado também é crucial, influenciando não apenas a força de ligação, mas também questões ambientais, como a utilização de adesivos poliuretanos (MÖLLEKEN et al., 2017). Além disso, o processo de prensagem, incluindo temperatura e pressão, é um fator determinante nas propriedades finais dos compensados (BUZO, 2018).

Em estudos de Sugahara (2022) evidenciou-se a superioridade das propriedades físicas e mecânicas de painéis fabricados com adesivo poliuretano em relação aos mais utilizados no mercado, como painéis fabricados com fenol-formaldeído. Ainda são apontados comportamentos de aumento nas propriedades mecânicas de painéis fabricados com esse adesivo, como aumento da resistência ao cisalhamento e melhor interação entre os componentes da madeira que possuem características hidrófobas.

Além dos fatores mencionados, a densidade dos painéis compensados também desempenha um papel essencial nas suas propriedades. A densidade está diretamente relacionada à quantidade de material utilizado e ao espaçamento entre as lâminas, impactando características como a resistência e a estabilidade dimensional dos painéis. Estudos como o de Pimentel et al. (2019), que envolve a fabricação de painéis compensados com madeiras tropicais amazônicas com adesivos de acetato de polivinila (PVAc) e poliuretano, destacam a importância dos adesivos utilizados na fabricação para alcançar propriedades mecânicas desejadas. A compreensão desses diversos fatores e a busca contínua por inovações no processo de produção são fundamentais para aprimorar as propriedades dos painéis compensados, consolidando-os como uma solução robusta e sustentável em diversas aplicações industriais. Ademais, a análise da resistência da linha de cola, como abordado por Lopes et al. (2013), e a avaliação do comportamento mecânico de painéis compensados fabricados com adesivo poliuretano, conforme investigado por Wilczak (2014), fornecem esclarecimentos sobre a durabilidade e a robustez dos produtos fabricados com essa tecnologia. Essas pesquisas contribuem para o entendimento mais aprofundado das

propriedades físicas e mecânicas dos painéis, essenciais para garantir a conformidade com os padrões de qualidade e desempenho exigidos pelos consumidores e pela indústria.

3.3 Madeira de pinus

A madeira de pinus é uma matéria-prima amplamente utilizada na indústria de painéis e na construção civil, destacando-se pelo seu rápido crescimento, versatilidade e disponibilidade em diferentes regiões. O pinus é uma espécie conífera que pertence à família Pinaceae, sendo uma escolha popular devido à sua capacidade de se adaptar a uma variedade de condições climáticas e de solo. Como ressalta Gilio (2020), a madeira de pinus é frequentemente empregada na produção de painéis compensados, aglomerados e outros produtos, devido à sua uniformidade, baixa densidade e boa aceitação de adesivos.

Os benefícios da madeira de pinus vão além da sua aplicação em painéis, alcançando a construção de estruturas leves, como em treliças e vigas. A rapidez no crescimento dessa espécie é um fator determinante para a sua disponibilidade econômica, como mencionado por Trevisan (2021), tornando o pinus uma escolha sustentável para a indústria de madeira. Ademais, sua composição celular e características mecânicas fazem com que a madeira de pinus seja uma opção viável para diversos fins, contribuindo para a diversificação de fontes de matéria-prima na indústria de painéis (CAZELLA, 2022). Essa matéria prima é conhecida pela sua maleabilidade durante o processo de fabricação, tornando-a adequada para diferentes métodos de produção de painéis. A utilização de pinus em conjunto com adesivos, como poliuretanos, como explorado por Mölleken et al. (2017), destaca-se como uma interessante estratégia para aprimorar as propriedades dos painéis, combinando a eficiência do adesivo com as características da madeira de pinus. Essa combinação evidencia a versatilidade e a aplicabilidade dessa espécie na produção de materiais derivados da madeira, impulsionando a sustentabilidade e a eficiência na indústria.

No contexto do setor de construção e fabricação, a madeira de pinus é reconhecida por suas propriedades estruturais, sendo frequentemente escolhida em projetos que demandam resistência e estabilidade. Silva et al. (2023) esse estudo demonstra a adaptabilidade da madeira de pinus e suas variantes em contextos específicos, indicando o potencial de diversificação de fontes na indústria madeireira, sendo que esse material não apenas oferece características físicas e estruturais favoráveis, mas também desempenha um papel relevante na gestão sustentável de florestas. A rápida taxa de crescimento permite ciclos de colheita mais curtos, contribuindo para a redução da pressão sobre florestas nativas. A madeira de pinus se mostra como uma escolha superior às madeiras de espécies angiospermas (*hardwood*) por sua menor densidade e melhor interatividade com os adesivos,

apresentando maior resistência à delaminação e cisalhamento, além de, ao contrário de espécies de crescimento acelerado como eucaliptos, as pináceas possuem menor porcentagem de lenho juvenil e assim são mais livres de tensões internas, que podem prejudicar o processo de fabricação (SHIRMOHAMMADLI, 2023).

3.4 Adesivos

Os adesivos desempenham um papel crucial na fabricação de painéis de madeira, influenciando diretamente as propriedades mecânicas e físicas do produto final. O desenvolvimento e a utilização de adesivos poliuretanos, introduzem uma visão sustentável nesse contexto. Apesar da eficácia do adesivo uréia formaldeído na produção de compensados e aglomerados, a liberação de formaldeído, um subproduto do processo de cura desse adesivo, é uma preocupação ambiental e de saúde. Estudo como o de Buzo (2018), têm explorado os efeitos da liberação de formaldeído na qualidade do ar interno e nas emissões atmosféricas, destacando a necessidade de regulamentações rigorosas para minimizar esses impactos adversos.

O adesivo poliuretano atualmente é um dos adesivos de maior notoriedade dentre os materiais poliméricos por possuir propriedades mecânicas de destaque, incluindo alta resistência química, estabilidade à variação de temperatura e usabilidade em uma gama variada de aplicações, além de sua elevada durabilidade (SOMARATHNA, 2018). Ainda de acordo com o estudo de Somarathna (2018), a produção desse adesivo em escala industrial teve início na década de 1940, crescendo a uma taxa anual de aproximadamente 7,4%.

Os adesivos poliuretânicos produzem painéis de madeira com menor teor de umidade e melhores interações com água, incluindo menor inchamento e absorção de água e apesar da maior utilização de painéis de madeira fabricados com adesivos fenólicos, o adesivo poliuretano se mostra como uma alternativa viável para produtos com finalidade de uso em condições severas. (SUGAHARA, 2022)

Os adesivos poliuretanos, derivados de compostos poliméricos, apresentam-se como uma alternativa mais sustentável em comparação com alguns adesivos tradicionais. Sua aplicação na indústria de painéis, como mencionado por Wilczak (2014), destaca a versatilidade desses adesivos em proporcionar resistência mecânica e durabilidade aos produtos finais (ATHANÁZIO-HELIODORO et al., 2018). A utilização desse adesivo em estudos, como os de Sugahara (2018) em painéis aglomerados, evidencia não apenas sua eficácia mecânica, mas também seu potencial para impulsionar práticas mais sustentáveis na indústria.

3.5 Linha de cola

A linha de cola desempenha um papel central na fabricação de painéis de madeira, influenciando diretamente a integridade estrutural e as propriedades finais dos produtos. O uso de adesivos poliuretanos na linha de cola representa uma abordagem inovadora que impacta positivamente a indústria de painéis. Estudos, como os de Lopes et al. (2013), que investigam a resistência da linha de cola em painéis de *Pinus taeda* colados lateralmente, evidenciam a importância de compreender como os adesivos influenciam as características mecânicas dos produtos. Adesivos poliuretanos têm se destacado nesse contexto, proporcionando força de ligação significativa e contribuindo para a durabilidade dos painéis.

A pesquisa voltada para a absorção de água e o inchamento volumétrico em compensados colados com adesivo poliuretano à base de mamona, conforme abordado por Athanázio-Heliodoro et al. (2018), destaca a relevância de considerar não apenas a resistência mecânica, mas também a estabilidade dimensional dos painéis. Essa análise contribui para a adequabilidade dos materiais em aplicações sujeitas a condições ambientais variáveis.

A resistência da área de colagem, conforme explorado por Biazzon (2018) na produção de painéis sarrafeados, ressalta a necessidade de adesivos que garantam uma aderência robusta e duradoura. A aplicação de adesivos poliuretanos tem demonstrado atender a esses requisitos de maneira eficaz, proporcionando resultados consistentes.

4 CONCLUSÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A evolução no campo dos adesivos para painéis de madeira é de grande relevância para o presente estudo. A substituição de adesivos convencionais por adesivo poliuretano reflete a busca por alternativas de mercado em grande escala e a inovação tecnológica. A incorporação de materiais alternativos, como bagaço de cana e resíduos de movelaria, na fabricação de painéis aglomerados e compensados, e a diversificação das fontes de madeira utilizadas, como pinus e eucalipto, também podem ser citadas como práticas que reforçam a tendência de sustentabilidade e eficiência no contexto atual do mercado e indústria.

Essas ações não se limitam apenas à escolha de matérias-primas ótimas, mas também se estendem à otimização das propriedades físicas e mecânicas dos painéis, garantindo a qualidade e a durabilidade dos produtos. Estudos sobre a resistência da linha de cola e a avaliação do comportamento mecânico dos adesivos poliuretanos deixam em evidência a importância da pesquisa contínua e do desenvolvimento tecnológico para atender às demandas do mercado e às regulamentações ambientais.

A indústria florestal está se adaptando aos produtos buscados pelo mercado e sociedade, onde a sustentabilidade e a inovação são fatores de grande relevância. A adoção de

adesivos poliuretanos e a diversificação das fontes de matéria-prima, destacam-se como processos expressivos para que ocorra avanços no campo da tecnologia da produção de painéis e outros produtos derivados de madeira.

REFERÊNCIAS

ATHANÁZIO-HELIDORO, J. C.; D'ELAQUA-SANTOS, G. F.; LARA-PALMA, H. A.; BALLARIN, A. W. Absorção de água e inchamento em compensados colados com adesivo natural poliuretano à base de mamona. **Open Science research**, p. 24, 2022.

BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, R. V. O et al. Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus sp.* colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

BIAZZON, J.C. **Análise da resistência da área de colagem na produção de painéis sarrafeados empregando-se adesivo poliuretano**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica - UNESP), 2018.

BUDDI, T.; MAHESH, K.; MUTTIL, N.; RAO, B. N.; NAGALAKSHMI, J.; SINGH, S. K. **Characterization Of Plywoods Produced By Various Bio-Adhesives**. In: **5th International Conference on Materials Processing and Characterization (ICMPC 2016)**. Hyderabad, India, Elsevier, 2017. ISSN 2214-7853.

BUZO, A. L. S. C. **Painéis aglomerados produzidos com partículas de pinus e bagaço de cana empregando-se ureia formaldeído e poliuretano à base de mamona**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - UNESP), 2018.

CARVALHO, E. J. M. **Painéis particulados fabricados com casca de mamona e poliuretano à base de óleo de mamona**. Tese (Doutorado em Recursos Florestais - USP), 2023.

CAZELLA, P. H. S. **Avaliação de painéis aglomerados homogêneos de pinus com incorporação de partículas de pet aglutinados com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - UNESP), 2022.

CREMONEZ, V. G.; BONFATTI, E. A. J.; ANDRADE, A. S.; SILVA, E. L.; KLITZKE, R. J.; KLOCK, U. Wood basic density effect of *Eucalyptus grandis* in the paper making. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Pernambuco, n, e-12420, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190003.0735>

FARIA, D. L.; MESQUITA, L. J.; MESQUITA, R. G. A.; GUIMARÃES, J. M.; PIRES, N. et al.. Production of castor oil-based polyurethane resin composites reinforced with coconut husk fibers. **Journal of Polymer Research**, Switzerland, v. 27, n. 249, 2020.

GILIO, C. G. **Avaliação de painéis de partículas homogêneas empregando-se madeira de Hevea brasiliensis e Tectona grandis, aglutinadas com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - UNESP), 2020.

HERRADON, M. P. **Resíduos de movelaria com polietileno tereftalato para produção de painéis aglomerados aglutinados com poliuretano derivado de mamona**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - UNESP), 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103358>.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. Relatório Anual. **IBÁ**, 2022. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em 30/11/2023.

LOPES, M. C.; MUNIZ, G. I. B.; MATOS, J. L. M.; TANOBE, V. O. A.; CHINASSO, C. A. F. et al. Resistência da linha de cola de painéis de *Pinus taeda* colados lateralmente com diferentes adesivos. **Cerne**, v. 19, p. 613-619, 2013.

MAGALHÃES, M. A. de; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. de C. O.; SILVA, C. M. S. da; FILHO, L. de F.; FIGUEIRÓ, C. G.; FERREIRA, J. C. Adição de lignina Kraft à resina fenólica para a fabricação de compensados. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, Viçosa, MG, v. 10, n. 2, p. 142-149, 2019. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v10n2p142-149.

MODES, K. S.; COZER, V.; JÚNIOR, M. D.; VIVIAN, M. A. Propriedades físico-mecânicas de painéis compensados com a madeira de *Cupressus lusitanica* Mill. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 33, n. 3, e74002, p. 1-17. 2023. <https://doi.org/10.5902/1980509874002>.

MÖLLEKEN, R. E. **Aplicação do adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona na obtenção de painéis de madeira colados lateralmente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia - Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2017.

PIMENTEL, T. S.; WIMMER, P.; CARVALHO, H. R.; ROITMAN, L.; MENNEZZI, C. H. S. Resistência ao cisalhamento da linha de cola em madeiras tropicais amazônicas. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 132, 2021.

PIZZOL, V. D.; MANTILLA, J. N. R.; CARRASCO, E. V. M. Caracterização elástica de compensados de madeira utilizados e reutilizados em fôrmas através de excitação por impulso. **Revista Matéria**, e-11928, ISSN 1517-7076, 2017.

SANTOS, K. C. **Avaliação de adesivos para colagem de borda em painéis de fibras de madeira**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química - IFRS), 2023.

SHIMIZU, J. Y. (2008). **Pínus na Silvicultura Brasileira**. Embrapa Florestas, Colombo, PR.

SHIRMOHAMMADLI, Y.; PIZZI, A.; RAFTERY, G.; HASHEMI, A. One-component polyurethane adhesives in timber engineering applications: A review, **International Journal of Adhesion and Adhesives**; n. 103358, v. 123, 2023. ISSN 0143-7496,

SILVA, J. S. P. **Avaliação do MOE e MOR de painéis homogêneos produzidos com serragem, polietileno tereftalato e poliuretano derivado de óleo de mamona**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - UNESP), 2022.

SILVA, M. L. J.; LOBO, M. V. F. CUNHA, R. D. A.; CÉSAR, S. F. Viabilidade do uso de madeira clonal de *Eucalyptus urophylla* de rápido crescimento para produção de madeira lamelada colada (MLC) com adesivo poliuretano à base de mamona. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 28, p. e20230073, 2023.

SOMARATHNA, H.M.C.C. et al. The use of polyurethane for structural and infrastructural engineering applications: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 995-1014, 2018.

SUGAHARA, E. S. **Painéis aglomerados produzidos com partículas de eucalipto e bagaço de cana, com adesivos ureia formaldeído e poliuretano à base de mamona**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - UNESP), 2018.

SUGAHARA, E.; CASAGRANDE, B.; ARROYO, F.; DE ARAUJO, V.; SANTOS, H.; FAUSTINO, E.; CHRISTOFORO, A.; CAMPOS, C. Comparative study of plywood boards produced with castor oil-based polyurethane and phenol-formaldehyde using *pinus taeda l.* veneers treated with chromated copper arsenate; **Forests**, 13, 1144; Basel, Switzerland; 2022.

TREVISAN, M. F. **Painéis aglomerados homogêneos produzidos com partículas de pinus e seringueira e aglutinados com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona: avaliação das propriedades físicas e mecânicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - UNESP), 2021.

WILCZAK, L. **Avaliação do comportamento mecânico do adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado na produção de painéis compensados**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia de Produção Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2014.

ZHANG, X. et al; A novel Co/TiO₂ nanocomposite derived from a metal–organic framework: synthesis and efficient microwave absorption. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 9, 2016.

SEGUNDA PARTE - ARTIGO

Qualidade de painéis compensados de *Pinus sp.* utilizando adesivo poliuretano

Victor Guimarães Arantes¹, Douglas Lamounier Faria¹, Lourival Marin Mendes¹, José Benedito Guimarães Junior¹

¹Universidade Federal de Lavras/UFLA, Departamento de Ciências Florestais/DCF, Lavras, MG, Brasil - victor.arantes@estudante.ufla.br; douglas.faria3@ufla.br; lourival@ufla.br; jose.guimaraes@ufla.br

ORCID:

Victor Guimarães Arantes: (<https://orcid.org/0009-0001-8619-3071>)

Lourival Marin Mendes: (<https://orcid.org/0000-0001-8713-405X>)

Douglas Lamounier Faria: (<https://orcid.org/0000-0002-5405-8430>)

José Benedito Guimarães Junior: (<https://orcid.org/0000-0002-9066-1069>)

RESUMO No contexto industrial da produção de painéis compensados de madeira, a escolha do adesivo adequado desempenha um papel determinante na garantia da qualidade e durabilidade dos painéis. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas de painéis compensados produzidos com madeira de *Pinus sp.* e adesivo poliuretano em diferentes gramaturas. Ao contrário dos adesivos fenólicos tradicionais, o poliuretano tem se destacado devido às suas propriedades superiores de adesão, resistência à umidade e maior durabilidade, além de não emitir formaldeído. Foram produzidos painéis compensados compostos por cinco lâminas de 2 mm de espessura, utilizando diferentes gramaturas de adesivo poliuretano (240, 280 e 320 g/m²). Os painéis foram submetidos a testes físicos, incluindo avaliação de umidade, densidade aparente e absorção de água, e a testes mecânicos, como flexão estática nas posições *flatwise* e *edgewise* e resistência ao cisalhamento, além de análise de epifluorescência da linha de cola. Os resultados observados revelaram que a redução da gramatura não afetou a resistência ao cisalhamento, sendo verificados na condição seca valores de 1,34 MPa para a gramatura de 240 g/m² e 1,63 MPa para a gramatura de 320 g/m². Concluiu-se baseado nos resultados deste

estudo que o adesivo poliuretano se mostra como uma alternativa viável para a indústria de painéis de madeira.

Palavras-chave: Caracterização de painéis, gramaturas, epifluorescência, qualidade, alternativa

ABSTRACT In the industrial context of wood veneer plywood production, the selection of the appropriate adhesive plays a crucial role in ensuring the quality and durability of the panels. In this regard, this study aimed to assess the physical and mechanical properties of plywood panels manufactured with *Pinus sp.* wood and polyurethane adhesive at different weight per unit areas. Unlike traditional phenolic adhesives, polyurethane has stood out due to its superior properties of adhesion, moisture resistance, increased durability, and the absence of formaldehyde emission. Plywood panels composed of five layers with a thickness of 2 mm each were produced, using varying weights of polyurethane adhesive (240, 280, and 320 g/m²). The panels underwent physical tests, including moisture evaluation, apparent density, and water absorption, as well as mechanical tests such as static bending in flatwise and edgewise positions, shear strength, and analysis of adhesive line epifluorescence. The observed results revealed that the reduction in weight per unit area did not affect shear strength, with dry condition values of 1.34 MPa for 240 g/m² and 1.63 MPa for 320 g/m² weight per unit area. Based on the results of this study, it has been concluded that polyurethane adhesive proves to be a viable alternative for the wood panel industry.

Keywords: Plywood characterization, grammage, epifluorescence, quality, alternative.

1. INTRODUÇÃO

A criação de novas opções produtivas com maior valor agregado por meio da diversificação de produtos madeireiros é de grande relevância no contexto comercial e industrial. Isso levou ao surgimento de uma geração de produtos da madeira conhecidos genericamente como "produtos confeccionados à base de madeira" (FARIA et al., 2020). Esses produtos passam por um processo de transformação em que a madeira é reduzida a frações ou componentes mais elementares ou convenientes por meio de processos industriais, com o objetivo de obter um melhor desempenho estrutural.

Os painéis compensados de madeira são um desses produtos industrializados que ganhou grande popularidade e aplicação em diversas indústrias. De acordo com Iwakiri et al. (2020), o compensado, também conhecido como madeira compensada, é um tipo de painel composto por lâminas de madeira que são sobrepostas em camadas ímpares e coladas umas às outras, de forma que a direção dos veios das camadas adjacentes formem um ângulo de 90 graus entre si com adesivos para criar um painel com distribuição uniforme de resistência e diversificados potenciais de uso. Segundo Shimizu (2008), os compensados de pinus se destacam como um dos produtos de madeira sólida mais competitivos no mercado internacional. As propriedades mecânicas e físicas dos painéis compensados de madeira são influenciadas pela espécie de madeira selecionada, tipo de adesivo utilizado, número, espessura e orientação das camadas, apresentando em geral características desejáveis. Nos últimos anos, houve um aumento na demanda global por produtos feitos à base de madeira.

De acordo com o relatório de 2022 da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), os painéis compensados de pinus obtiveram alta de 22% no volume comercializado com o exterior entre o período do primeiro trimestre de 2020 a 2021, alcançando 608 mil m³, atingindo um total de 2,6 milhões de m³ no total exportado do ano, representando uma alta de 4% em relação ao ano anterior.

Atualmente o Brasil figura entre um dos maiores produtores de painéis compensados fabricados com madeiras de espécies coníferas, produzindo 3,4 milhões de m³ estimados (MODES et al., 2023). Em relação aos adesivos contendo formaldeído, pode ser citada uma desvantagem essa substância ser potencialmente carcinogênica, caso haja exposição a concentrações superiores a 0,1 ppm (BUDDI et al., 2016; PAULA et al., 2020).

Estudos como os de Cremones et al. (2019) se concentraram na diversificação de densidade de madeiras, onde foram experimentados diferentes tratamentos silviculturais para eucalipto e o trabalho de Goulart et al. (2023) sobre a resistência ao cisalhamento produzindo

painéis com adesivo à base de taninos de barbatimão. Além disso, Magalhães et al. (2019) investigaram composições de adesivos mistos com resinas fenólicas e lignina Kraft, enquanto Galdino (2020) analisou as propriedades físicas de painéis compensados fabricados com adesivo de poliuretano e tratados com termorretificação. Em contraste com estas pesquisas, este estudo tem como objetivo avaliar as propriedades físicas, mecânicas e a linha de cola de compensados de madeira produzidos com diferentes gramaturas de adesivo poliuretano.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Matérias-primas

Foram obtidas toras de *Pinus sp.* com 18 anos de idade, do plantio experimental na Universidade Federal de Lavras (Lavras, Minas Gerais, Brasil), que fica a uma latitude a 21° 14' 45" Sul, 1630 mm anuais de chuva e classificação climática de Köppen CWA, que foram cortadas em comprimentos de 0,60 m, removidas da base de cada árvore. As lâminas de madeira foram obtidas por meio de um torno de lâminas rotativas, após o aquecimento das toras a 70 °C por um período de 24 h em água, segundo as recomendações de Iwakiri et al. (2020). As toras foram então laminadas pelo torno, produzindo lâminas de madeira com espessura nominal de 2 mm. As lâminas foram secas em estufa a 105 ± 2 °C por 24 h. Após a secagem, as lâminas foram cortadas e aparadas para as dimensões de 0,48 x 0,48 m. O adesivo utilizado foi poliuretano Loctite UR 5151, que possui pH 7,0, densidade 1,125g/cm³, viscosidade pelo método Brookfield a 20 °C de 5 Pa.s, e 100% de teor de sólidos.

2.2 Produção dos painéis compensados

Foram produzidos painéis compensados constituídos de 5 lâminas, intercalando-se perpendicularmente as direções das grãs, de modo que haja três lâminas em uma direção e duas com a direção formando um ângulo de 90 graus.

A produção dos painéis e os testes físicos e mecânicos foram realizados no Laboratório de Adesão e Adesivos da Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira (UEPAM) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), onde três painéis foram fabricados para cada composição. Na Figura 1 são demonstradas algumas das etapas do processo de fabricação dos painéis.

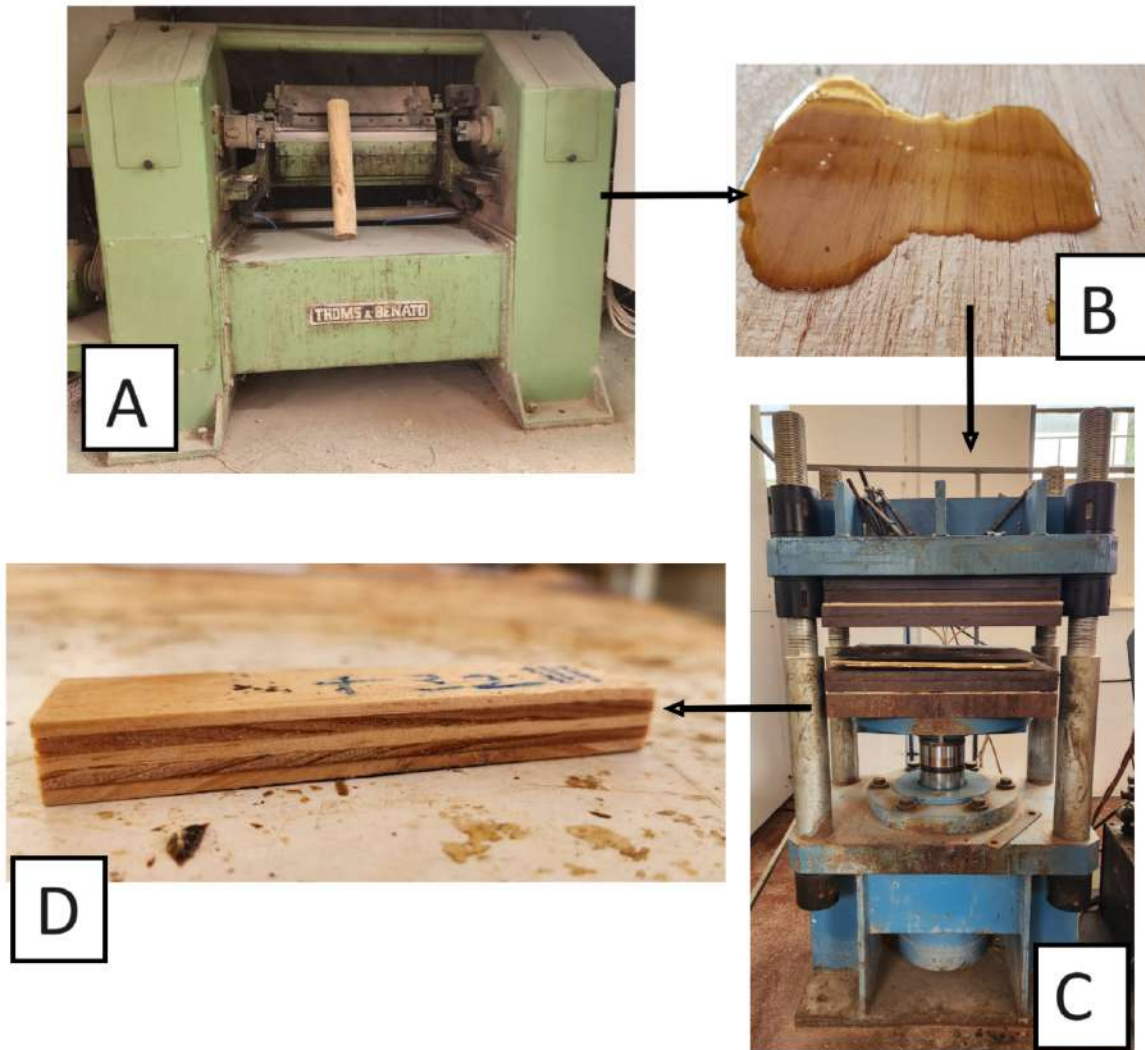


Figura 1 - Produção dos painéis compensados de madeira; A: Torno laminador com rolo resto; B: Adesivo poliuretano na lâmina; C: Prensa hidráulica com painel de madeira; D: Amostra do painel já pronto.

Fonte: do autor (2023).

Foram utilizadas gramaturas de 240, 280 e 320 g/m² de adesivo por linha de cola, sendo espalhados na superfície da lâmina de *Pinus sp.* manualmente com espátula. A prensagem foi feita durante o período de 24 h, a uma pressão de 1,5 MPa a frio. Após a prensagem, os painéis compensados foram armazenados em uma câmara climatizada com temperatura de 20 ± 3 °C com umidade relativa de 65 ± 5% até atingir a umidade de equilíbrio de aproximadamente 12%.

As composições avaliadas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Delineamento experimental utilizado.

Composição	Gramatura (g/m²)	Adesivo
T1	240	Poliuretano
T2	280	Poliuretano
T3	320	Poliuretano

Fonte: do autor (2023).

2.3 Propriedades físicas dos painéis compensados

A densidade aparente dos painéis compensados foi calculada utilizando amostras de 50 x 50 mm, de acordo com a NBR 17002 (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2021),.

A umidade dos painéis compensados foi calculada utilizando amostras de 50 x 50 mm, com base na norma NBR 9484 (ABNT, 1986).

A absorção de água dos painéis compensados foi calculada utilizando amostras de 75 x 25 mm, seguindo o padrão da norma NBR 9486 (ABNT, 2011).

O inchamento volumétrico utilizou amostras de 30 x 25 x 11 mm, seguindo o padrão da NBR 9535 (ABNT, 2021) para determinação dos valores das amostras.

Os ensaios realizados utilizaram três amostras por painel de cada composição, totalizando nove amostras por composição.

2.4 Propriedades mecânicas dos painéis compensados

2.4.1 Cisalhamento

A resistência ao cisalhamento na linha de cola foi obtida através da avaliação de doze amostras, teste demonstrado na Figura 2, cortadas de acordo com o padrão D-2339-98 (ASTM, 2017). Os testes foram realizados em uma máquina de ensaio pneumática (modelo I 4230, Contenco-Pavitest Cisalhamento 1.01-0) com velocidade de carga de 0,6 mm/min. A Figura 2 mostra o teste de resistência ao cisalhamento.



Figura 2 - Resistência ao cisalhamento.

Fonte: do autor (2023).

2.4.2 Flexão estática

O teste de flexão estática foi realizado em duas posições: na posição de corte ao longo das fibras (*Flatwise*) e na posição de corte perpendicular às fibras (*Edgewise*), como indicado na Figura 3. As amostras foram testadas em uma máquina universal de ensaios Arotec equipada com uma célula de carga de 20 kN. Na posição *edgewise*, seguiu-se o padrão D-3043 (American society for testing and methods - ASTM, 2017) adaptado para a espessura final das amostras de painel compensado, com velocidade de teste de 2 mm/min, enquanto que na posição *flatwise*, a velocidade de teste adotada foi de 5,8 mm/min, calculando-se posteriormente os módulos de elasticidade (MOE) e ruptura (MOR) das amostras de acordo com a norma D-198 (ASTM, 2008).

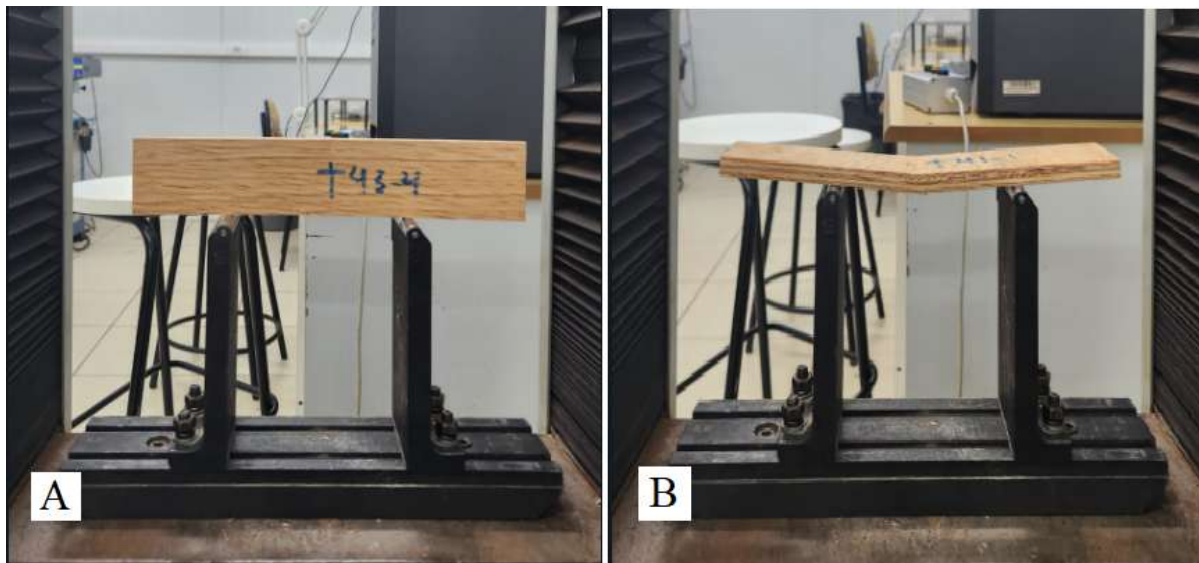


Figura 3 - Posições dos testes de flexão estática; A: *Edgewise* ; B: *Flatwise*.

Fonte: do autor (2023).

2.4.3 Epifluorescência

As amostras foram obtidas a partir dos painéis compensados com dimensões de 10 x 10 x 10 mm, posteriormente saturando-as em uma bomba de vácuo. Os cortes foram realizados usando um micrótomo de deslizamento (Leica SM 2000R), sendo fixados em lâminas com glicerina. As imagens foram obtidas por um microscópio de epifluorescência (Zeiss) conectado a um computador (software Image Pro-Plus 5.1) no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural (LME) da Universidade Federal de Lavras (UFLA). A espessura média da linha de cola foi obtida entre os dois pontos extremos da amostra, utilizando o software *ImageJ*, fazendo 30 medições por amostra, sendo três amostras por composição. Os ajustes lineares foram feitos utilizando a função *linregress*, da biblioteca Python Scipy, de modo a calcular uma regressão linear de mínimas distâncias verticais quadradas para dois conjuntos de medidas, enquanto os ajustes polinomiais de equações preditivas foram realizados utilizando a função *polyfit*, da biblioteca Python Numpy, de forma a minimizar o erro quadrático entre os pontos de dados fornecidos e o polinômio estimado,

$$1.p(x) = p[0] \times x^{deg} + p[1] \times x^{deg-1} + \dots + p[deg] \quad (1)$$

Onde *deg* é o grau do polinômio e *p[1]* são os coeficientes do polinômio.

2.5 Análise estatística

Os resultados foram submetidos a análise estatística utilizando a linguagem python com o método ANOVA do pacote *scipy.stats*. Após rejeição da hipótese nula, foi realizada a

comparação das médias utilizando o teste de Tukey. A normalidade dos dados foi verificada utilizando o teste de Shapiro-Wilk. Todas as análises estatísticas foram realizadas com um nível de significância de 95% de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades físicas dos painéis compensados

Os resultados obtidos para as propriedades físicas dos painéis compensados são apresentados na Tabela 2, relacionando a composição às propriedades de densidade aparente, umidade, absorção de água e inchamento volumétrico.

Tabela 2 - Resultados observados para as propriedades físicas dos painéis compensados.

Composição	Densidade		Inchamento		
	aparente (g/cm ³)	Umidade (%)	Absorção de água (%)		volumétrico (%)
			(2 h)	(24 h)	
			17,65 (0,04)		
T1	0,60 (0,04) A*	7,64 (0,25) A	A	25,22 (1,02) A	7,78 (1,37) A
			17,37 (0,06)		
T2	0,61 (0,06) A	7,94 (0,41) A	A	24,91 (2,04) A	7,69 (1,48) A
			17,22 (0,04)		
T3	0,67 (0,02) B	8,61 (0,30) B	A	25,48 (1,06) A	7,95 (1,37) A

*Conforme o teste Tukey com nível de significância de 95%, médias seguidas da mesma letra na mesma coluna indicam igualdade estatística. Valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão.

Fonte: do autor (2023).

Foi constatado que somente a composição T3 obteve diferença significativa na avaliação da densidade aparente, possuindo até 0,07 g/cm³ a mais do que as outras composições, representando um aumento relativo de até 10,18% em massa (g) por volume (cm³). Segundo Silva et al. (2018), uma das propriedades físicas mais importantes em produtos feitos a partir da madeira é a densidade, onde geralmente, o painel compensado apresenta densidade maior do que a madeira utilizada como matéria-prima. Os valores obtidos são condizentes com os valores observados por Iwakiri et al. (2020) e Sugahara (2022), que foram em média de 0,634 g/cm³ e 0,65 g/cm³, respectivamente, para painéis fabricados com madeira de pinus e adesivo poliuretano, com exceção da composição T3, que

ficou ligeiramente acima de tal valor, possuindo em média densidade 9,42% maior. Tais valores podem ser explicados pela gramatura mais elevada da composição T3.

Em relação à umidade observou-se significância estatística entre as composições, com T3 se enquadrando em um grupo estatístico diferente dos demais. Tais resultados são condizentes com os observados por Sugahara (2022), onde painéis compensados fabricados com poliuretano tiveram valores de densidade aparente de 0,65 g/m² e absorção de água 6,4%.

Em relação aos testes de absorção de água, as composições não apresentaram diferenças estatísticas relevantes com as mudanças de gramatura, evidenciando as propriedades hidrorrepelentes do adesivo poliuretano (SUGAHARA, 2022). Entretanto, os valores observados foram inferiores aos do estudo de Athanázio-Heliodoro et al. (2022), que obtiveram valores médios próximos de 42% para painéis fabricados com adesivo poliuretano.

Em relação ao inchamento volumétrico, não foi constatada diferença significativa entre as composições. Os resultados observados no presente trabalho foram ligeiramente superiores aos valores verificados por Li et al. (2014), com valores médios de 5,5% de inchamento volumétrico para o adesivo poliuretano, em contraste à média de 7,8% das três composições desse estudo. Tal comportamento pode ser justificado pela utilização de diferentes espécies de coníferas, apesar da mesma composição de adesivo.

É evidente a importância da capacidade dos painéis de preservar suas dimensões originais em ambientes úmidos. Para aplicações em ambientes externos ou locais com variações de umidade, a seleção do adesivo e o controle do processo de fabricação tornam-se ainda mais críticos. Absorção de água excessiva não só impacta a estabilidade dimensional, mas também interfere nas propriedades mecânicas, durabilidade e resistência a agentes biológicos, como evidenciado por vários estudos (ZHANG et al., 2016).

3.2 Propriedades mecânicas dos painéis compensados

A propriedade de cisalhamento refere-se à capacidade do painel em resistir às forças que atuam perpendicularmente às suas faces. Essa propriedade é crucial para determinar a estabilidade e a resistência do painel em situações de carregamento lateral. Por sua vez, a resistência à flexão estática é um indicativo da capacidade do painel em suportar cargas aplicadas no plano horizontal.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de cisalhamento nas condições seco, úmido e pós-fervura.

Composições	Cisalhamento (MPa)		
	Seco	Úmido	Pós-fervura
T1	1,34(0,40) A*	1,27(0,29) A	1,48(0,26) AB
T2	1,62(0,63) A	1,52(0,40) A	1,29(0,64) A
T3	1,63(0,30) A	1,72(0,49) A	1,97(0,32) B

*Conforme o teste Tukey com nível de significância de 95%, médias seguidas da mesma letra na mesma coluna indicam igualdade estatística. Valores entre parênteses se referem ao desvio padrão.

Fonte: do autor (2023).

Observou-se que os valores de resistência ao cisalhamento não aumentaram com a gramatura de poliuretano, não havendo diferença estatística para as composições nas condições seca e úmida, enquanto para a condição pós-fervura foram observados enquadramentos mistos. Esses valores foram ligeiramente inferiores em comparação com os observados no estudo de Galdino (2023), onde foram utilizadas lâminas de 2,5 mm nominais e gramatura de 395 g/m² com médias das amostras de controle sem tratamentos de termorreificação próximas de 2 MPa.

É importante salientar que todas as composições atenderam ao requisito mínimo de 1,0 MPa estabelecido pela norma europeia EN 314 (1993), sugerindo uma boa resistência dos painéis com poliuretano a variações de temperatura e umidade. Este é um indicativo da adequação dos adesivos poliuretano para a produção de painéis compensados de alta qualidade. A Tabela 4 apresenta os resultados para os ensaios de flexão estática nas posições *flatwise* e *edgewise*, contendo MOR e MOE.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios mecânicos de flexão estática dos painéis compensados avaliando MOR e MOE.

Composição	Flexão Estática			
	<i>Flatwise</i>		<i>Edgewise</i>	
	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
			252,87(67,03)	
T1	14,14 (4,79) A*	4116,70 (2261,18) A	A	892,25(216,36) A
			282,10(66,55)	
T2	14,59 (4,77) A	4136,66 (1238,96) A	A	866,80(151,57) A
			321,78(45,71)	
T3	15,16 (3,93) A	3671,18 (1648,10) A	A	957,13(233,27) A

*Conforme o teste Tukey com nível de significância de 95%, médias seguidas da mesma letra na mesma coluna indicam igualdade estatística. Valores entre parênteses se referem ao desvio padrão.

Fonte: do autor (2023).

O módulo de ruptura é a medida da tensão máxima a qual o material resiste, sendo uma propriedade de grande relevância na análise das propriedades mecânicas de um material (NETO, 2016). Nos resultados observados, o MOR das formulações não foram estatisticamente superiores, assim como no sentido *edgewise*, que não foram observadas diferenças estatísticas entre as composições. Tal comportamento entra em conformidade com o estudo de Faria (2020) que afirma que devido à viscosidade do poliuretano, a fabricação de painéis compensados com esse material permite que mesmo em gramaturas baixas possibilita a formação de ganchos de ancoragem adesiva com a madeira, garantindo propriedades mecânicas adequadas para os mesmos. A variação não considerável nos valores de MOR e MOE para diferentes espessuras de linha de cola também pode sugerir que fatores como densidade aparente e umidade não influenciaram os resultados, o que poderia ser esperado, de acordo com Zhang et al. (2016).

3.3 Epifluorescência

Ao analisar a epifluorescência dos painéis compensados, é possível identificar áreas com ausência de adesivo, presença de bolhas ou outros defeitos que possam comprometer a resistência estrutural do painel. Essas informações são essenciais para garantir a qualidade do

produto final e sua adequação para diferentes aplicações. A Tabela 5 apresenta os valores observados médios das linhas de colas para as diferentes composições.

Tabela 5 - Espessuras de linhas de cola para as diferentes composições estudadas.

Composição	Espessura da linha de cola (μm)
T1	90,82 (9,12) A*
T2	96,614 (23,16) A
T3	161,75 (12,04) B

*Conforme o teste Tukey com nível de significância de 95%, médias seguidas da mesma letra na mesma coluna indicam igualdade estatística. Valores entre parênteses se referem ao desvio padrão.

Fonte: do autor (2023).

A Figura 4 apresenta imagens de cor natural e utilizando a técnica de epifluorescência feitas com amostras das diferentes composições utilizadas nesse estudo.

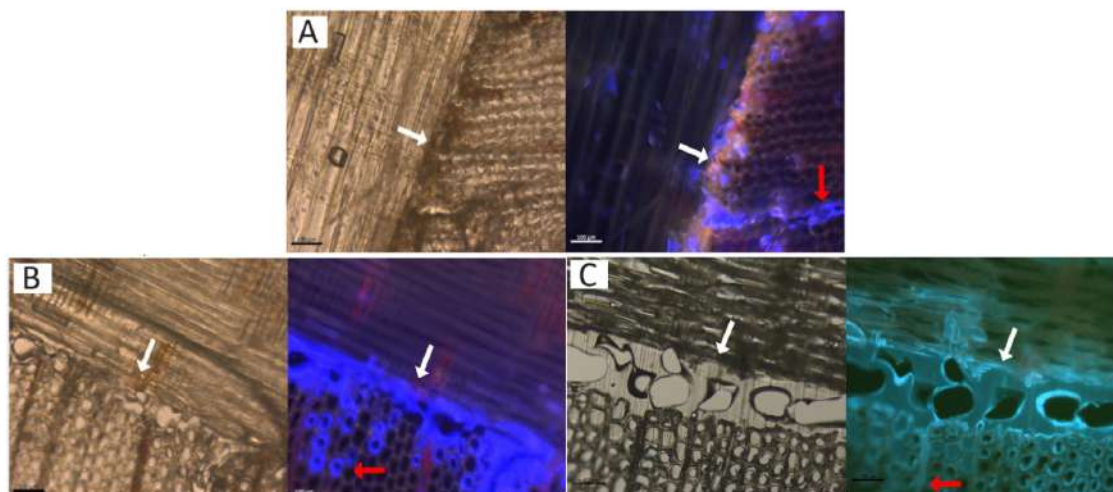


Figura 4 - Linhas de cola e adesivos em evidência por epifluorescência; A: Composição T1; B: Composição T2; C: Composição T3; Setas brancas indicam a linha de cola, setas vermelhas indicam a penetração do adesivo na estrutura da madeira.

Fonte: do autor (2023).

A espessura da linha de cola em painéis compensados é um fator crítico que afeta diretamente as propriedades mecânicas do material final, como MOR e o MOE. As composições T1 e T2 apresentaram a menor espessura de linha de cola, enquanto a composição T3 resultou na linha de cola mais espessa, se enquadrando em um grupo estatístico distinto.

É sugerido pela literatura que uma linha de cola mais espessa pode resultar em uma distribuição desigual das tensões aplicadas ao material, o que potencialmente comprometeria a transferência de carga entre as fibras de madeira e, conseqüentemente, afetaria a resistência mecânica do material (PIMENTEL, 2021), no entanto tal fenômeno não foi observado nos testes mecânicos, evidenciando que menores gramaturas e, conseqüentemente, linhas de cola mais finas, ainda se mantêm adequadas se em comparação com maiores gramaturas.

A presença de linhas de cola mais espessas, como observado na composição T3, induz a uma maior interação entre as lâminas de madeira e o poliuretano, que pode ser atribuído também à melhor habilidade em se espalhar o estresse físico gerado por umidade absorvida pelo material (YUSOF et al., 2019), características essas que não foram constatadas nos ensaios mecânicos. No entanto, é essencial considerar que um excesso de adesivo pode também resultar em zonas frágeis dentro da linha de cola, onde o adesivo não se cura adequadamente, levando a um potencial ponto de falha (FERNANDES, 2021).

Na Figura 5 é apresentada a relação entre a espessura da linha de cola e as propriedades MOE e MOR das amostras, realizando-se ajuste polinomial e obtenção de equações que podem descrever com razoável precisão o fenômeno relacional entre essas duas características.

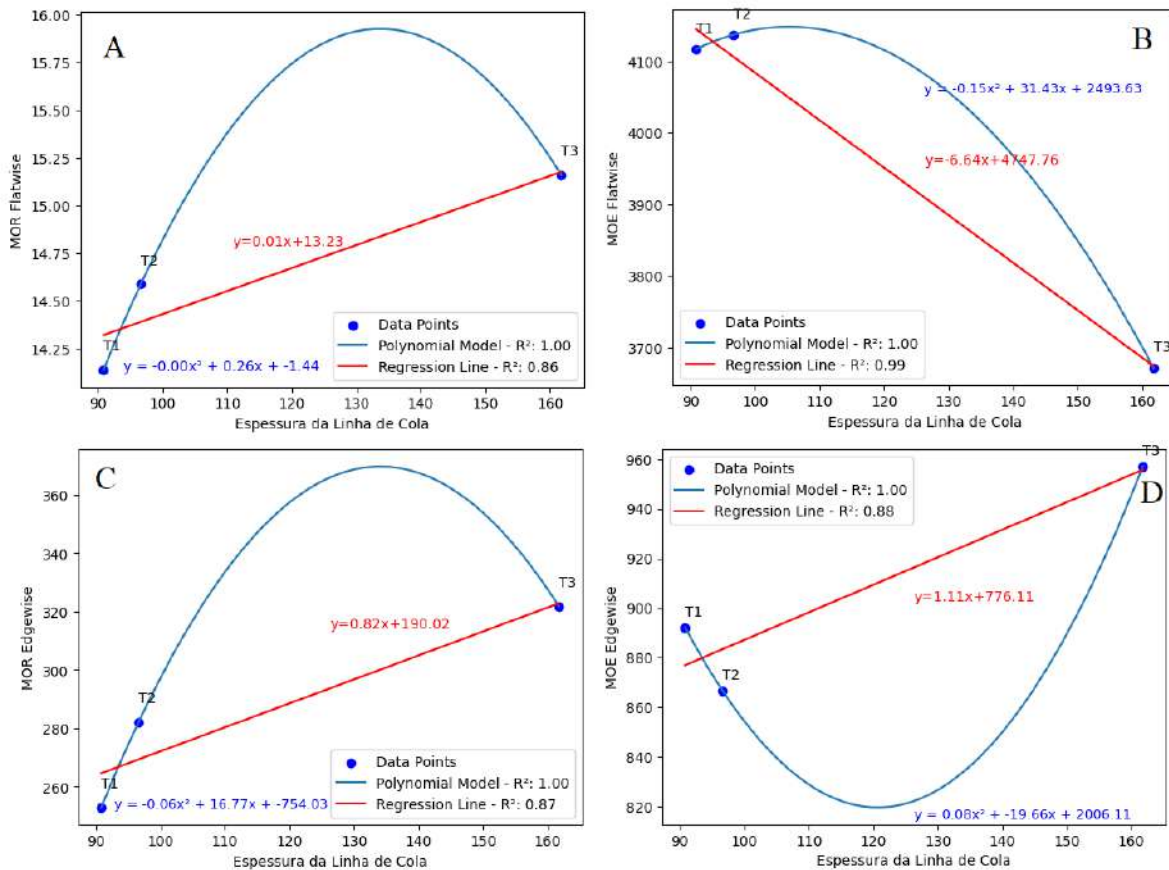


Figura 5 - Ajustes de modelos polinomiais relacionando a espessura da linha de cola e módulos de elasticidade e ruptura dos painéis compensados; A: Relação espessura e MOR *flatwise*; B: Relação espessura e MOE *flatwise*; C: Relação espessura e MOR *edgewise*; D: Relação espessura e MOE *edgewise*.

Fonte: do autor (2023).

Na Figura 5 percebe-se que há indicativos da existência de uma correlação entre a espessura da linha de cola e os valores de MOR e MOE. Foram utilizadas as técnicas de regressão linear e regressão polinomial para ajuste dos modelos. Assim, nesse contexto, a regressão polinomial parece ter um ajuste melhor, com valores de R^2 de 1 em contraste com valores de R^2 variando entre 0,87 e 0,99 para os ajustes lineares, indicando que um modelo polinomial pode ser mais adequado para captar as relações não-lineares entre a espessura da linha de cola e as propriedades mecânicas. Finalmente, com base nessas observações, pode-se concluir que, enquanto existe uma possível tendência relacionando a espessura da linha de cola com as propriedades mecânicas dos painéis compensados, uma análise mais aprofundada com uma amostra maior e controle de variáveis pode ser favoráveis para validação e refinar essas observações, entendendo melhor como essa relação entre as duas variáveis se comporta.

4. CONCLUSÕES

Os painéis compensados fabricados com diferentes gramaturas de adesivo poliuretano se mostraram promissores para o setor industrial em diversos aspectos físicos, mecânicos e em relação à sua linha de cola, evidenciando adequação aos padrões na resistência ao cisalhamento, MOR, e MOE no ensaio de flexão estática e linhas de colas, sendo essas características desejáveis para obtenção de um produto final de qualidade para as diversas finalidades do mercado consumidor. Além de possuir certas propriedades físicas e mecânicas interessantes mesmo em menores gramaturas, o adesivo não possui formaldeído, podendo ser uma alternativa viável ao mercado em escalas industriais. Ainda é relevante pontuar a respeito do fato de existir evidências apontando para uma correlação entre a espessura da linha de cola e a resistência à flexão estática, demonstrados nos ajustes polinomiais e lineares, com elevados coeficientes de correlação.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos dos autores à Universidade Federal de Lavras (UFLA), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio das instituições a essa pesquisa.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D-198**: Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes, West Conshohocken, United States, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D-2339-98**: Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Two-Ply Wood Construction in Shear by Tension Loading, West Conshohocken, United States, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D-3043**: Standard Test Methods for Testing Structural Panels in Flexure, West Conshohocken, United States, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17002**: Compensado: Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9484**: Compensado: determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9535**: Compensado: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 1986.

ATHANÁZIO-HELIODORO, J. C.; D'ELAQUA-SANTOS, G. F.; LARA-PALMA, H. A.; BALLARIN, A. W. Absorção de água e inchamento em compensados colados com adesivo natural poliuretano à base de mamona. **Open Science research**, p. 24, 2022.

BUDDI, T.; MAHESH, K.; MUTTIL, N.; RAO, B. N.; NAGALAKSHMI, J.; SINGH, S. K. **Characterization Of Plywoods Produced By Various Bio-Adhesives**. In: **5th International Conference on Materials Processing and Characterization (ICMPC 2016)**. Hyderabad, India, Elsevier, 2017. ISSN 2214-7853

CISNE, R. P.; TELES, A. M. S.; PEREIRA-SAMPAIO, M. A.; GORNIK, S. L.; PAPA, P. C. et al. Can a tannic acid-based solution substitute formalin as a fixative for macroscopic specimens? *acta scientiae anatomica*, **Official Journal of the Anatomy Society of the Rio de Janeiro State**; Rio de Janeiro, Brasil, 2020.

CREMONEZ, V. G.; BONFATTI JUNIOR, E. A.; ANDRADE, A. S.; SILVA, E. L., KLITZKE, R. J.; KLOCK, U. Wood basic density effect of *Eucalyptus grandis* in the paper

making. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Pernambuco, n, e-12420, 2019.

<https://doi.org/10.1590/S1517-707620190003.0735>

FARIA, D. L.; EUGÊNIO, T. M. C.; LOPES, D. E.; PROTÁSIO, T. P.; MENDES, L. M. et al.. Particleboards produced with different proportions of *Hevea brasiliensis*: Residual wood valorization in higher value-added products. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 45, e021420, 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202145021420>

FARIA, D. L.; LOPES, T. A.; SCATOLINO, M. V.; PROTÁSIO, T. P.; NASCIMENTO et al. Studying the grammage in LVL panels glued with castor oil-based polyurethane adhesive: a possible alternative to formaldehyde releasing adhesives. **CERNE**, v. 26, n. 1, p. 140-149, 2020.

FARIA, D. L.; RIBEIRO, L. P.; OLIVEIRA, K. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Propriedades físicas e mecânicas de painéis de lâminas paralelas (PLP) produzidos com madeira de *Hevea brasiliensis*. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 10, n. 3, p. 247-254, 2019. <http://DOI: 10.12953/2177-6830/rm.v10n3p247-254>.

FERNANDES, F. J. S. **Otimização topológica do adesivo de juntas coladas constituídas pela sobreposição de dois aderentes utilizando o modelo de zona coesiva como critério de ruptura**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2021.

Food and Agriculture Organization of the United Nations - **FAO**, Forestry Production and Trade. <https://www.fao.org/faostat/>, 2023 (Acessado em 29/11/2023)

GALDINO, D.S. **Análise do desempenho do painel de madeira compensada produzido com lâminas termorretificadas por dois diferentes métodos e coladas com resina poliuretana**. 2020. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2020.

GILO, C. G.; BISPO, R. A.; TREVISAN, M. F.; RODRIGUES, F. R.; JUNIOR, L. C. F. A.; MELLO DA SILVA, S. A. Produção de painéis aglomerados empregando seringueira, teca e poliuretano derivado de óleo de mamona. **Revista Principia**, João Pessoa, n. 57, 2021.

GOULART, S. L.; MORI, F. A.; ALMEIDA, N. F. de; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Resistência ao Cisalhamento de Painéis Compensados Produzidos com Adesivo à Base de

Taninos de *Stryphnodendron adstringens* (barbatimão). **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 3, p. 308-315, jul./set. 2012. <http://dx.doi.org/10.4322/loram.2012.036>

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. Relatório Anual. **IBÁ**, 2022. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em 30/11/2023.

INTERAMNENSE, Á. T. (1998). **Utilização das madeiras de *Eucalyptus cloeziana* (F. Muell), *Eucalyptus maculata* (Hook) e *Eucalyptus punctata* DC var. *punctata* para produção de painéis compensados**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**, 2nd Edition. Curitiba, FUPEF, 2020.

MAGALHÃES, M. A. de; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. de C. O.; SILVA, C. M. S. da; FILHO, L. de F.; FIGUEIRÓ, C. G.; FERREIRA, J. C. Adição de lignina Kraft à resina fenólica para a fabricação de compensados. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, Viçosa, MG, v. 10, n. 2, p. 142-149, 2019. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v10n2p142-149.

MODES, K. S.; COZER, V.; JÚNIOR, M. D.; VIVIAN, M. A. Propriedades físico-mecânicas de painéis compensados com a madeira de *Cupressus lusitanica* Mill. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 33, n. 3, e74002, p. 1-17. 2023. <https://doi.org/10.5902/1980509874002>.

NETO, P. M.; PAES, J. B.; SEGUNDINHO, P. G. A. Determinações dos módulos de elasticidade e ruptura de madeiras por técnicas não destrutivas e destrutiva. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 111, p. 683-690, set. 2016. dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n111.14

PIMENTEL, T. S.; WIMMER, P.; CARVALHO, H. R.; ROITMAN, L.; MENNEZZI, C. H. S. Resistência ao cisalhamento da linha de cola em madeiras tropicais amazônicas. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 132, 2021.

PIZZOL, V. D.; MANTILLA, J. N. R.; CARRASCO, E. V. M. Caracterização elástica de compensados de madeira utilizados e reutilizados em fôrmas através de excitação por impulso. **Revista Matéria**, e-11928, ISSN 1517-7076, 2017.

SHIMIZU, J. Y. (2008). **Pínus na Silvicultura Brasileira. Embrapa Florestas**, Colombo, PR.

SILVA, L.; OLIVEIRA, L.; SILVA, H.; SOUSA, P.; BARROS, D. Aproveitamento energético de resíduos da indústria moveleira. Universidade Federal do Paraná. **Universidade Federal Rural da Amazônia**, 2018.

SUGAHARA, E.; CASAGRANDE, B.; ARROYO, F.; DE ARAUJO, V.; SANTOS, H. et al. Comparative study of plywood boards produced with castor oil-based polyurethane and phenol-formaldehyde using *pinus taeda l.* veneers treated with chromated copper arsenate; **Forests**, 13, 1144; Basel, Switzerland; 2022.

YUSOF, N. M.; TAHIR, P. M.; LEE, S. H.; KHAN, M. A.; JAMES, R. M. S. Propriedades mecânicas e físicas de Madeira Laminada Cruzada fabricada a partir de madeira de Acacia mangium como função dos tipos de adesivos. **Journal of Wood Science**, v. 65, n. 20, 2019.

ZHANG, X. et al; A novel Co/TiO₂ nanocomposite derived from a metal–organic framework: synthesis and efficient microwave absorption. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 9, 2016.