



UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENQ4016AQ - TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

VITÓRIA MISTURINI BERLAVER

**ANÁLISE DO USO DE DIFERENTES TEORES DE RESINA FENÓLICA NATURAL
A BASE DE TANINO PARA IMPREGNAÇÃO DE MADEIRA DE PINUS**

CAXIAS DO SUL
2025

VITÓRIA MISTURINI BERLAVER

**ANÁLISE DO USO DE DIFERENTES TEORES DE RESINA FENÓLICA NATURAL
A BASE DE TANINO PARA IMPREGNAÇÃO DE MADEIRA DE PINUS**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade de
Caxias do Sul como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Matheus Poletto.

CAXIAS DO SUL

2025

VITÓRIA MISTURINI BERLAVER

**ANÁLISE DO USO DE DIFERENTES TEORES DE RESINA FENÓLICA NATURAL
A BASE DE TANINO PARA IMPREGNAÇÃO DE MADEIRA DE PINUS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Matheus Poletto.

Banca Examinadora

Prof^a. Dr^a Jadna Catafesa
Universidade de Caxias do Sul

Me. Oscar de Almeida Neuwald
Universidade de Caxias do Sul

AGRADECIMENTOS

Quero, em primeiro lugar, agradecer a Deus, por ter guiado meus passos ao longo de toda a graduação. Por me proteger nas viagens noturnas até a faculdade e por me dar força e persistência diante de cada desafio que surgiu no caminho.

À minha família, que sempre foi meu porto seguro. Em especial aos meus pais, Rejane e Rudimar, e à minha irmã, Ana Paula, meu agradecimento eterno por todo o apoio, carinho, paciência e compreensão ao longo dessa caminhada. Em cada momento de cansaço ou dúvida, foram vocês que me lembraram do porquê de seguir em frente. Sem o amor e incentivo de vocês, esse sonho não teria ganhado forma. Essa conquista é tão de vocês quanto minha!

Ao meu companheiro de vida, meu amor, Carlos: obrigada por estar ao meu lado em todos os momentos, pelos conselhos, pela paciência, pelas palavras de incentivo e, principalmente, por acreditar em mim até quando eu mesma duvidei. Você sempre enxergou meu potencial e me lembrou do quanto eu sou capaz, mesmo nas fases mais difíceis. Obrigada por sonhar junto comigo, por viver cada etapa desse processo como se fosse sua também. Tenho certeza de que essa é apenas uma das muitas conquistas que ainda vamos celebrar lado a lado.

Às amigas que a vida universitária me deu e que levarei para sempre no coração: Bianca, Eduarda, Ingrid, Nicole e, com muito carinho e saudade, a nossa querida Érica, que permanece viva em nossas memórias. Vocês fizeram dessa jornada algo muito mais leve, divertido e especial. Entre risadas, desabafos, noites de estudo e até lágrimas, fomos juntas, celebrando cada conquista, por menor que fosse. Que essa amizade siga firme na vida profissional e pessoal, porque tenho orgulho de ter ao meu lado mulheres tão incríveis e com tanto potencial.

Aos professores que, com tanta dedicação, compartilharam seu conhecimento e sua paixão pelo ensino: meu muito obrigada. Cada aprendizado foi essencial para meu crescimento, tanto acadêmico quanto pessoal.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Matheus Poletto, pela orientação cuidadosa, pelas sugestões, correções e, principalmente, pelo incentivo constante ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua ajuda foi fundamental.

À banca examinadora, Dra. Jadna Catafesa e Me. Oscar de Almeida Neuwald, agradeço imensamente por aceitarem o convite e por contribuírem com esse trabalho através de suas valiosas considerações.

Por fim, à empresa Tramontina Cutelaria S.A., pela oportunidade de desenvolver este projeto e por todo o apoio e contribuição durante esse período tão importante da minha formação.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo analisar o uso de diferentes teores de resina fenólica natural à base de tanino na impregnação de madeira de pinus para a produção de painéis compensados do tipo LVL (*Laminated Veneer Lumber*). A pesquisa surge como uma resposta às crescentes preocupações ambientais e de saúde pública relacionadas ao uso de resinas sintéticas à base de formaldeído, reconhecidas por suas emissões de compostos orgânicos voláteis (COVs) e classificadas como cancerígenas. Foram desenvolvidas formulações variando os percentuais de tanino natural, tanino modificado (15%, 25%, 35% e 50%), bem como a resina fenólica sintética (15%, 25%, 35% e 50%), com o objetivo de avaliar o impacto dessa substituição nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis. As amostras produzidas passaram por ensaios de determinação da massa específica, absorção de água, inchamento em espessura e resistência à flexão estática (Módulo de Ruptura – MOR e Módulo de Elasticidade – MOE). Além disso, foi realizada análise morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e testes para quantificação das emissões de formaldeído e fenol. Os resultados mostraram que as formulações contendo até 25% de tanino, tanto natural quanto modificado, apresentaram desempenho físico e mecânico satisfatório, comparável ou até superior ao painel padrão com 50% de resina fenólica sintética. Já os painéis produzidos com 50% de tanino mostraram fragilidade estrutural e elevada absorção de água, o que os torna inadequados para aplicações que exijam resistência à umidade. O estudo conclui que a substituição parcial da resina fenólica por taninos é tecnicamente viável, podendo reduzir as emissões de formaldeído e contribuir para a sustentabilidade da indústria de painéis de madeira, sem comprometer a qualidade final do produto. A pesquisa reforça o potencial de utilização de adesivos naturais, como os taninos, como uma alternativa mais ecológica na produção de compósitos de madeira.

Palavras-chave: Tanino. Resina fenólica. Painéis de madeira. Sustentabilidade. Formaldeído.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the use of different levels of natural tannin-based phenolic resin for the impregnation of pinus wood in the production of LVL (Laminated Veneer Lumber) plywood panels. The research responds to growing environmental and public health concerns regarding the use of synthetic formaldehyde-based resins, known for their volatile organic compound (VOC) emissions and classified as carcinogenic. Several formulations were developed, varying the percentages of natural tannin, modified tannin (15%, 25%, 35%, and 50%) as well as synthetic phenolic resin (15%, 25%, 35%, and 50%), with the goal of evaluating the impact of this substitution on the physical and mechanical properties of the panels. The samples underwent tests for apparent density, water absorption, thickness swelling, and static bending resistance (Modulus of Rupture – MOR and Modulus of Elasticity – MOE). Additionally, morphological analysis by Scanning Electron Microscopy (SEM) and tests for quantifying formaldehyde and phenol emissions were performed. The results showed that formulations containing up to 25% tannin, both natural and modified, achieved satisfactory physical and mechanical performance, comparable or even superior to the standard panel made with 50% synthetic phenolic resin. Panels with 50% tannin showed structural fragility and high water absorption, making them unsuitable for moisture-resistant applications. The study concludes that the partial replacement of phenolic resin with tannins is technically feasible, helping reduce formaldehyde emissions and contributing to the sustainability of the wood panel industry without compromising final product quality. The research highlights the potential of natural adhesives, such as tannins, as an eco-friendlier alternative in wood composite production.

Keywords: Tannin. Phenolic resin. Wood panels. Sustainability. Formaldehyde.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de montagem dos pacotes para painéis de madeira LVL.	18
Figura 2 - Balanço comercial por segmentos em 2023.	19
Figura 3 - Principais países produtores de painéis de madeira em 2023.	20
Figura 4 - Faces madeira de <i>Pinus elliottii</i>	22
Figura 5 - Ilustração de impregnação por pressão a vácuo.	24
Figura 6 - Estrutura molecular do fenol.	30
Figura 7 - Obtenção de resina resol-novolaca.	31
Figura 8 - (a) Tanino hidrolisável e (b) tanino condensado.	34
Figura 9 - Extrato de tanino em pó.	34
Figura 10 - Fluxograma de processo de preparação dos corpos de prova.	41
Figura 11 - Morfologia da amostra R50 em MEV com 2000x de ampliação.	51
Figura 12 - Morfologia da amostra R25TN25 em MEV com 2000x de ampliação.	52
Figura 13 - Morfologia da amostra R35TN15 em MEV com 2000x de ampliação.	53
Figura 14 - Morfologia da amostra R25TM25 em MEV/EDS com 2000x de ampliação.	54
Figura 15 - Morfologia da amostra R35TM15 em MEV com 2000x de ampliação. ...	55
Figura 16 - Mapeamento elementar por EDS das amostras	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classe e valor limite superior das emissões de formaldeído para derivados de madeira.....	28
Tabela 2 - Características dos taninos e resina utilizados na formulação de solução para impregnação.	39
Tabela 3 - Formulação de solução para impregnação das lâminas de madeira.	39
Tabela 4 – Massa específica das soluções estudadas	46
Tabela 5 – Resultados das propriedades físicas dos painéis.....	47
Tabela 6 - Classificação dos painéis conforme a massa específica.....	48
Tabela 7 - Resultados dos testes de flexão estática.	49
Tabela 8 - Determinação da concentração de fenol e formaldeído	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVO GERAL	15
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1. PAINÉIS COMPENSADOS DE MADEIRA	17
2.1.1. Panorama nacional do mercado de painéis	19
2.1.2. Madeira de pinus	20
2.1.3. Impregnação de madeira	23
2.1.4. Propriedades Físico-Mecânicas dos compósitos	24
2.2. SUSTENTABILIDADE NA PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS.....	25
2.2.1. Regulamentações ambientais e de segurança relacionadas ao uso de formaldeído e resinas fenólicas	26
2.2.2. Problemas relacionado ao uso de formaldeído	29
2.3. COMPOSTOS FENÓLICOS.....	29
2.3.1. Resina fenol-formaldeído	30
2.3.2. Alternativas de resinas a base de componentes naturais	32
2.4. TANINOS.....	33
2.4.1. Resinas a base de taninos	35
2.4.2. Uso de resina a base de tanino para produção de painéis	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1. MATERIAIS	38
3.2. PREPARAÇÃO DE SOLUÇÃO PARA IMPREGNAÇÃO	39
3.3. PRODUÇÃO DOS PAINÉIS	40
3.4. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS PAINÉIS .	41
3.4.1. Determinação da massa específica aparente	41
3.4.2. Ensaio de absorção de água	42

3.4.3. Ensaio de inchamento em espessura	42
3.4.4. Ensaio de flexão estática (MOR e MOE)	43
3.4.5. Análise de morfologia	44
3.4.6. Ensaio de extração de Formol e Fenol	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA SOLUÇÃO	46
4.2. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PAINÉIS	47
4.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS	49
4.4. ANÁLISE MORFOLÓGICA DOS PAINÉIS	51
4.4.1. Análise por EDS (Espectroscopia de Dispersão de Energia)	56
4.5. PROPRIEDADES QUÍMICAS DOS PAINÉIS	57
5. CONCLUSÃO	59
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

A utilização de compostos de madeira tem sido destacada como uma alternativa sustentável e de elevado valor para as indústrias de construção e mobiliário. Entre esses compostos, os painéis compensados de madeira, especialmente aqueles produzidos com resinas adesivas, são amplamente aplicados pela sua resistência e capacidade de substituição de materiais sólidos com um custo reduzido. No entanto, a produção de painéis com resinas sintéticas, como o formaldeído, levanta sérias preocupações ambientais e de saúde, especialmente devido às emissões de compostos voláteis liberados ao longo de seu ciclo de vida.

Em resposta a esses desafios, cresce o interesse por alternativas mais ecológicas, como as resinas de base natural. Neste contexto, os taninos, compostos fenólicos encontrados em diversas espécies vegetais, surgem como uma alternativa promissora. A estrutura química dos taninos permite sua aplicação em resinas que, além de serem renováveis, apresentam propriedades adesivas que competem com as resinas sintéticas tradicionais, oferecendo uma opção menos tóxica e mais sustentável para o meio ambiente e para a saúde humana. Estudos recentes, como o de Hemmilä, *et al.*, (2017), reforçam as projeções de resinas à base de tanino, destacando seu menor impacto ambiental em comparação às resinas de fenol-formaldeído.

Alinhado a esses esforços, está o compromisso do setor de painéis de madeira com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU). O ODS 12, que visa garantir padrões sustentáveis de consumo e produção, é particularmente relevante para a indústria de compósitos de madeira e adesivos. Este objetivo está diretamente alinhado à redução do uso de substâncias químicas e à busca por alternativas sustentáveis, como as resinas naturais derivadas de taninos. A substituição de adesivos sintéticos por alternativas bioativas, segundo análises de ciclo de vida como as de Arias, *et al.*, (2020), reduz significativamente as emissões tóxicas e melhora o desempenho ambiental dos produtos, contribuindo para a redução do impacto de compostos orgânicos voláteis (COVs) no ambiente e na saúde pública.

O Brasil, com uma extensa área de plantio de florestas comerciais, especialmente de espécies de rápido crescimento como o *Pinus elliottii*, possui condições ideais para explorar a fabricação sustentável de painéis de madeira

utilizando resinas naturais. Dados do setor de árvores plantadas da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) indicam que as florestas plantadas no Brasil cobrem aproximadamente 10 milhões de hectares, e entre os segmentos atendidos, 4% são destinados à produção de painéis de madeira. Em 2023, o mercado de árvores plantadas gerou uma receita de R\$ 202,6 bilhões, reforçando o potencial econômico e a competitividade global do país.

Além das vantagens ambientais, o uso de resinas naturais pode trazer benefícios no desempenho dos painéis. A impregnação de madeiras com resinas de tanino é capaz de melhorar a resistência física e mecânica dos compósitos, tornando-os mais resistentes às deformações. Contudo, para que essas tecnologias sejam amplamente atendidas, é essencial compreender como a substituição de formaldeído por tanino afeta a qualidade do produto final e sua adequação às regulamentações vigentes.

Dessa forma, este trabalho propõe uma análise comparativa entre painéis de Pinus impregnados com resina de tanino e painéis tradicionais que utilizam formaldeídos, com o intuito de avaliar aspectos como durabilidade e resistência mecânica. A pesquisa busca contribuir para o desenvolvimento de alternativas viáveis e sustentáveis na produção de painéis de madeira, alinhando-se às demandas de um mercado cada vez mais atento às questões ambientais e de sustentabilidade.

1.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar comparativamente as propriedades físicas e químicas de painéis compósitos de pinus produzidos com resina fenólica sintética e diferentes teores de resina fenólica natural à base de tanino-formaldeído, buscando alternativas mais ambientalmente sustentáveis para produção de painéis de madeira.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral do trabalho foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar o efeito da substituição da resina fenólica por diferentes teores de tanino nas propriedades físicas e mecânicas do painel compensado.
- b) Investigar como a substituição total ou parcial do formaldeído por tanino impacta o desempenho da resina utilizada em painéis de madeira.
- c) Comparar a qualidade da adesão das lâminas de madeira utilizando microscopia eletrônica de varredura, para verificar as diferenças entre as resinas que contêm formaldeído sintético e aquelas que utilizam tanino.
- d) Analisar como a troca de formaldeído por tanino afeta as características físicas, como massa específica, absorção de água e propriedades mecânicas, como resistência à flexão, dos painéis de madeira.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. PAINÉIS COMPENSADOS DE MADEIRA

O setor de produtos florestais abrange, de maneira geral, os segmentos de madeira em tora, madeira serrada, painéis de madeira, celulose e papel. Esses materiais servem como base para diversas cadeias produtivas. Nos setores de construção civil e de móveis, por exemplo, a madeira serrada e os diferentes tipos de painéis de madeira atuam como bens substitutos (Moreira; Oliveira, 2017). Segundo o relatório referente ao ano de 2023 da associação da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), responsável pela representação institucional da cadeia produtiva de árvores plantadas, 4% das áreas plantadas no Brasil são destinadas a produtores de painéis de madeira.

A produção de painéis de compensado de madeira começou por volta da década de 1940, mas foi apenas a partir dos anos 1970 que atingiu níveis significativos. Além de serem produtos versáteis e amplamente utilizados, fazem parte de um grupo maior chamado compósitos de madeira, que são materiais obtidos pela colagem de lâminas ou fibras de madeira. Esses compósitos apresentam variações em sua composição estrutural, sendo a madeira e o adesivo as principais matérias-primas. O uso extensivo desse material se deve às suas propriedades mecânicas e à versatilidade em diversas aplicações. Contudo, apesar de sua importância para o país, o setor ainda enfrenta grande fragmentação. Entre os principais desafios estão as barreiras tecnológicas e os elevados custos das matérias-primas. O Brasil está entre os maiores produtores de compensado no cenário global (Gonçalves, *et al.*, 2017).

Segundo Vieira, *et al.*, (2012) o compensado é o painel de madeira mais produzido e consumido no Brasil, apesar do crescimento de outros tipos de painéis reconstituídos. Inicialmente, a indústria utilizava florestas naturais de araucária na região Sul, mas devido à escassez dessa madeira, passou a usar madeiras tropicais da região Norte na década de 70. Nos anos 1990, com a maturação das florestas plantadas de pinus no Sul do país e a pressão ambiental contra a exploração de florestas tropicais, a indústria começou a usar pinus. Devido à crescente competição por madeira, as indústrias também passaram a utilizar espécies de eucalipto, especialmente o *Eucalyptus grandis*, para a produção de compensados.

Os painéis compensados foram criados principalmente em resposta à escassez e ao aumento dos custos da madeira maciça. O desenvolvimento desses reflete a necessidade de inovar no uso da madeira como matéria-prima. Eles surgiram como resultado da busca humana por maneiras mais eficientes de utilizar e maximizar o aproveitamento do potencial da madeira (Freire, *et al.*, 2015). A evolução dos compósitos de madeira tem ampliado significativamente seu campo de aplicação, tornando-os materiais indispensáveis em diversos setores. Sua combinação de propriedades naturais da madeira com tecnologias modernas resulta em produtos versáteis, duráveis e sustentáveis, que continuam a evoluir e a atender às demandas de um mercado em constante mudança (Iwakiri, *et al.*, 2006).

A produção dos painéis de madeira LVL (*Laminated Veneer Lumber*) consiste na colagem de lâminas finas de madeira dispostas paralelas umas às outras, conforme a Figura 1. Esse arranjo confere ao material estabilidade dimensional e resistência mecânica. A colagem dessas lâminas é realizada através da impregnação da madeira com resinas sintéticas, e o painel passa por um processo de prensagem sob alta temperatura para garantir a integridade e a durabilidade. A escolha do tipo da resina a ser utilizada dependerá do das necessidades que deverão ser atendidas pelo material (Gonçalves, *et al.*, 2021).

Figura 1 - Processo de montagem dos pacotes para painéis de madeira LVL.



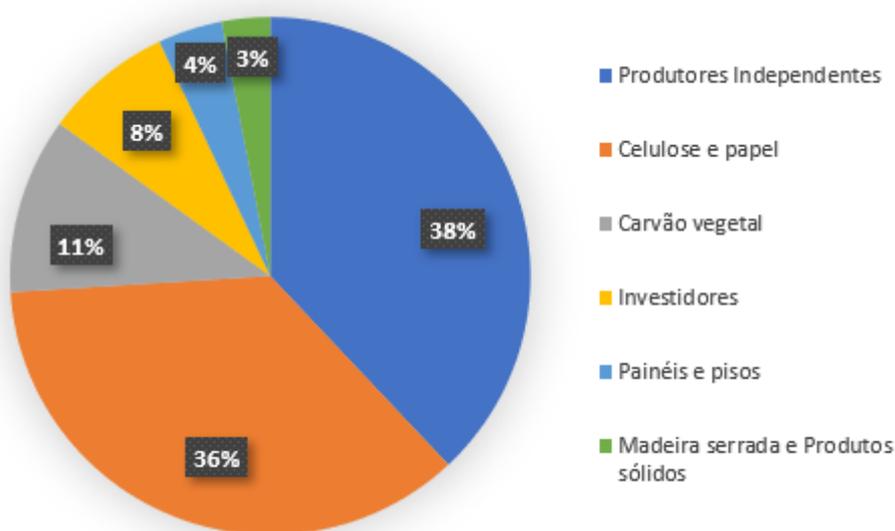
Fonte: Adaptado de Costa, *et al.*, (2020).

2.1.1. Panorama nacional do mercado de painéis

A indústria de painéis de madeira tem se destacado no setor florestal além de desempenhar um papel significativo na economia brasileira. Com base nas vastas plantações de florestas, consideradas de acelerado crescimento tais como pinus e eucalipto, entende-se que o Brasil possui condições favoráveis para se firmar como um dos principais produtores globais de painéis de madeira. Essa vantagem, combinada com o dinamismo dos mercados interno e externo, tem sido um dos principais impulsionadores dos novos investimentos no setor (Ribaski, *et al.*, 2017).

O setor de árvores cultivadas no Brasil, em 2023, segundo o relatório do IBÁ de 2024, registrou uma receita bruta de R\$ 202,6 bilhões, representando 0,9% do PIB brasileiro. O investimento em áreas de árvores plantadas, de dez milhões de hectares, representou 3% a mais que o ano anterior. A quantidade de árvores plantadas é subdividida para os segmentos de celulose e papel (36%), carvão vegetal e siderúrgica (11%) e, em quinto lugar, para o mercado de painéis de madeira e pisos laminados (4%), conforme a Figura 2.

Figura 2 - Balanço comercial por segmentos em 2023.



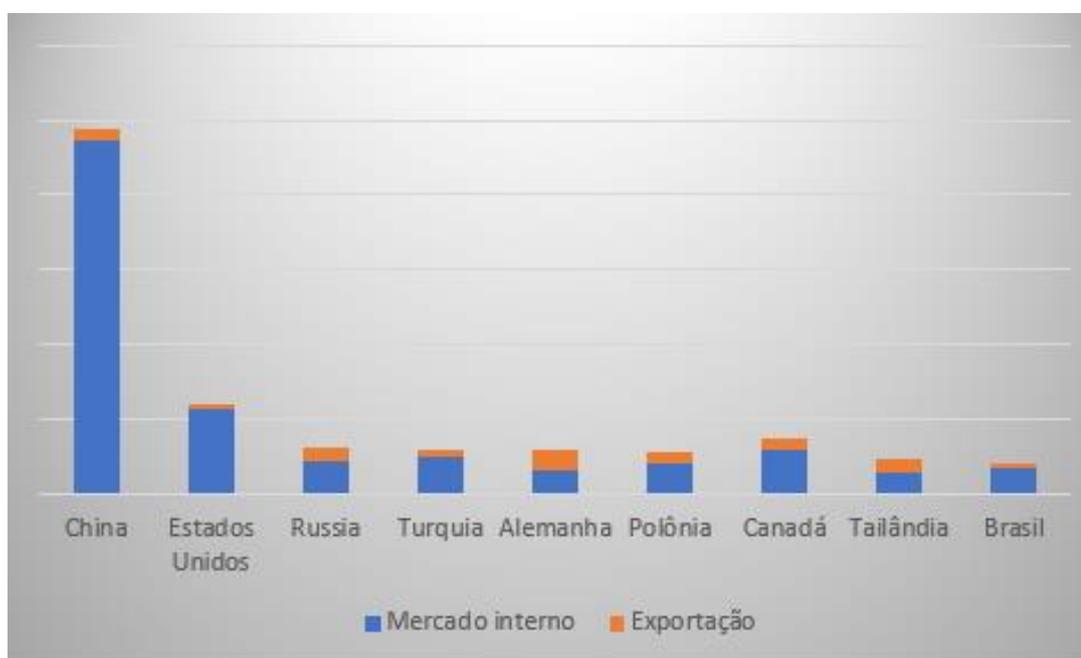
Fonte: Adaptado de IBÁ, 2024.

Os maiores consumidores de painéis compensados no mundo, em 2019, foram a China e os EUA que ocupam as primeiras posições do mercado

provavelmente pelo uso generalizado desse produto nas construções em elementos como fechamentos, contrapisos, contratetos, elementos estruturais e outros componentes (FAOSTAT, 2022).

Apesar de um cenário global desafiador, caracterizado por oscilações nos preços das commodities, ajustes de estoque no período pós-pandemia e uma demanda internacional instável, o setor brasileiro mantém alta competitividade no mercado mundial, conforme pode-se observar a Figura 3.

Figura 3 - Principais países produtores de painéis de madeira em 2023.



Fonte: Adaptado de IBÁ, 2024.

O volume de consumo doméstico de painéis de madeira no país foi cerca de 7,1 milhões de m³, tendo um aumento de 1,5% em relação ao ano de 2022. As exportações de compensados reduziram, passando de 1,5 milhões de m³ de painéis compensados em 2022, para 1 milhão de m³ em 2023, representando 2,3% da exportação do setor (IBÁ, 2024).

2.1.2. Madeira de pinus

A produção mundial de painéis compensados faz uso e diversas espécies de madeiras, no Brasil o gênero pinus domina a produção de compensados, cujo plantio está concentrado principalmente na região Sul do país (ABIMCI, 2022). Em 2021 houve um aumento de 22% na produção de compensados de pinus em relação

ao ano anterior, totalizando cerca de 608 mil m³ comercializados, o volume exportado de compensados de pinus foi de 2,6 milhões de m³ (IBÁ, 2022).

Devido ao alto volume e demanda da produção de painéis de madeira, dar prioridade ao uso de espécies de rápido crescimento é uma estratégia de suprimir a necessidade de madeira além de preservar os recursos naturais contra a exploração excessiva (Rovedder, *et al.*, 2021). O pinus é considerado uma espécie de rápido crescimento, o qual varia conforme a espécie de pinus, mas, em média, algumas espécies podem estar prontas para o corte em cerca de 15 a 25 anos, o que é relativamente curto comparado a outras árvores (Embrapa, 2023).

No Brasil, destaca-se o cultivo do *Pinus elliottii*, uma espécie que gera madeira de boa qualidade, amplamente utilizada em diferentes setores. Sua madeira é empregada na produção de resina, um importante insumo para as indústrias químicas e farmacêuticas, além de ser usada como madeira serrada, destinada à construção civil e à fabricação de móveis. Também se utiliza a madeira roliça para a confecção de postes e mourões, além de ser matéria-prima para as indústrias de polpa e papel. Um de seus principais usos é na produção de painéis de compensado, que são amplamente utilizados na construção civil, em móveis e em acabamentos diversos. No entanto, esta espécie possui certas características que limitam sua aplicação, como a instabilidade dimensional, baixa estabilidade térmica e resistência mecânica, o que pode restringir seu uso em projetos que exigem maior durabilidade e resistência a condições extremas (Rovedder, *et al.*, 2021).

A inspeção visual é o primeiro conjunto de testes de avaliação da qualidade dos materiais, especialmente quando se trata de madeira, que apresenta defeitos naturais frequentemente perceptíveis a olho nu. A madeira de pinus pode ser identificada pelos seus veios, que são uma das características visuais mais marcantes dessa madeira. O pinus tem um padrão de veios bem definido, com linhas que alternam entre mais claras e mais escuras, resultantes do crescimento anual da árvore. Essas camadas de crescimento formam anéis, visíveis principalmente em cortes transversais, que ajudam na identificação da madeira (Mayard, *et al.*, 2022), conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Faces madeira de *Pinus elliottii*.

Fonte: Madeiras IPT.

As principais propriedades físicas analisadas nas madeiras incluem a massa específica, a retração e as condutividades térmica e elétrica. Dentre elas, a massa específica é a que mais se relaciona com outras características, especialmente com a resistência mecânica. A forma mais comum de medir essa propriedade é através da massa específica, obtida pela razão entre a massa da madeira completamente seca e o volume que ela ocupa quando está saturada em água. No caso do *Pinus elliottii*, a massa específica é de $0,46 \text{ g/cm}^3$. A madeira dessa espécie também apresenta uma contração volumétrica de 5,5% e uma condutividade térmica de $0,5 \text{ W/mK}$ (Embrapa, 2023). A fim de melhorar estas características, inúmeros tratamentos foram testados com sucesso nas últimas décadas, os quais se dividem em três categorias que se diferenciam pelo tipo de agente e pelo método aplicado: a modificação química envolve reações com substâncias como anidrido acético ou formaldeído, que se ligam à estrutura molecular da madeira, alterando permanentemente suas propriedades para aumentar durabilidade e estabilidade; a impregnação consiste na introdução de produtos preservantes, resinas ou outros modificadores nos poros da madeira, geralmente por meio de ciclos de vácuo e pressão em autoclaves, sem alterar sua composição química de base; e a modificação térmica é feita aquecendo a madeira entre $160 \text{ }^\circ\text{C}$ e $260 \text{ }^\circ\text{C}$ em atmosferas com pouco ou nenhum oxigênio, degradando parcialmente polissacarídeos, reduzindo a higroscopicidade e aumentando a resistência biológica sem uso de aditivos químicos (Rovedder, *et al.*, 2021). A impregnação será o

método utilizado neste estudo, e assim será abordado com mais detalhes na próxima seção.

2.1.3. Impregnação de madeira

Tratamentos alternativos aos métodos mais tradicionais têm sido amplamente pesquisados, visando melhorar as propriedades da madeira. Esses tratamentos podem proporcionar benefícios significativos, como o aumento da resistência biológica, tornando a madeira mais durável contra pragas e fungos, e o aprimoramento da estabilidade dimensional, reduzindo deformações causadas por variações de umidade e temperatura. Essas modificações ampliam o uso da madeira em aplicações que exigem maior durabilidade e desempenho (Soares et al., 2018).

A modificação por impregnação consiste na inserção de um agente impregnante no interior das paredes celulares da madeira (espaços vazios e poros) produzindo um preenchimento dos espaços vazios na madeira. Estas partículas são selecionadas conforme a característica necessária que se espera do produto final (Rovedder, *et al.*, 2021).

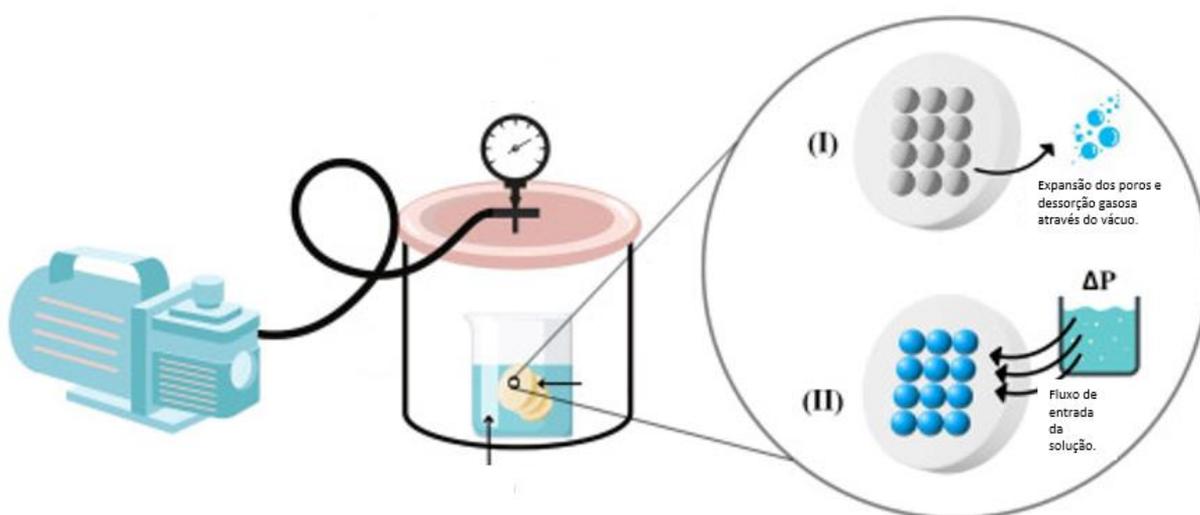
A eficiência do processo de impregnação está relacionada a diversas variáveis, como as características da madeira, incluindo espécie e estado, suas propriedades químicas, como polaridade e composição dos produtos utilizados, e as condições de impregnação, que envolvem os métodos aplicados e parâmetros como tempo, pressão e cura (Augustina, *et al.*, 2023).

A madeira possui estrutura capilar que atua como principal caminho para a absorção da solução, possibilitando sua entrada nas paredes celulares. Portanto a permeabilidade e a capacidade de penetração das diversas espécies de madeira influenciam a eficácia do processo de impregnação. O potencial de impregnação da madeira está relacionado à sua massa específica e à massa específica da solução utilizada. Quanto menor a massa específica da madeira, maior será sua porosidade, resultando em mais espaços vazios para a entrada da solução nas paredes celulares. Da mesma forma, soluções com menor massa específica têm mais facilidade para penetrar no interior da madeira (Augustina, *et al.*, 2019).

Segundo Augustina, *et al.*, (2023), a impregnação pode ser realizada através de imersão ou por pressão a vácuo, o conceito das duas técnicas é o mesmo, porém o vácuo seguido de aplicação de pressão acelera o processo de impregnação e

resulta em um processo mais eficiente. O processo é realizado em autoclave, onde as lâminas são dispostas em seu interior. Inicialmente, é aplicado um vácuo para remover o ar retido nas células da madeira, o que facilita a abertura das células vazias e as torna acessíveis à solução. Após essa etapa, a solução é introduzida no tanque do equipamento e uma pressão é aplicada para promover uma penetração mais profunda e uniforme da solução nas paredes celulares, conforme ilustrado na Figura 5. De maneira diferente, o método de imersão pode apenas impregnar a superfície da madeira, a menos que seja realizado por um período prolongado.

Figura 5 - Ilustração de impregnação por pressão a vácuo.



Fonte: Adaptado de Castaneda, *et al.*, 2023.

2.1.4. Propriedades Físico-Mecânicas dos compósitos

O entendimento profundo das propriedades físico-mecânicas dos compensados de madeira é fundamental, pois essas características afetam diretamente a viabilidade desses materiais em produtos acabados. Além de influenciar a durabilidade e a eficácia do material em aplicações específicas, como em cabos de utensílios domésticos, essas propriedades também têm um papel importante na estética e na funcionalidade do produto (Rindler, *et al.*, 2017).

De acordo com Rindler, *et al.*, (2017), a qualidade e a estabilidade dimensional dos painéis são impactadas diretamente pelo tipo de adesivo utilizado,

bem como por fatores relacionados ao processo de fabricação, como tempo de cura, pressão e temperatura de colagem, e viscosidade do adesivo.

A massa específica do compensado de madeira é uma característica essencial devido ao seu impacto direto em várias propriedades físicas e mecânicas do material. Essas propriedades incluem resistência, rigidez, estabilidade dimensional e até mesmo a aparência estética. Compensados com massa específica uniforme tendem a exibir uma estabilidade dimensional superior, tornando-os menos propensos a deformações decorrentes de variações de umidade ou temperatura. Essa estabilidade é crucial para garantir a integridade estrutural ao longo do tempo (Melo, 2013).

Conforme Gonçalves, *et al.*, (2017) a massa específica do compensado não reflete somente à massa específica da matéria prima utilizada, mas também a vários parâmetros relacionados ao processo de fabricação, como a taxa de compressão durante a prensagem, o teor de umidade das lâminas no momento da formação do pacote, o tempo de fechamento da prensa e a temperatura de prensagem. A absorção de água e a dilatação do compósito estão relacionadas à compactação do compensado, isso é, quando o mesmo não é compactado conforme a real necessidade, maior será a absorção e dilatação.

A absorção de água também pode ser relacionada à massa específica, isto pois, quanto menor a massa específica menor será a absorção de água, pois menor será a porosidade do compensado. A dilatação também pode ser influenciada pela impregnação não uniforme dos laminados, tendo quantidade de resina inadequada nas lâminas. Esse fenômeno ocorre porque o adesivo utiliza as hidroxilas livres das partículas como um dos mecanismos de adesão, preenchendo assim as áreas mais hidrofóbicas da madeira (Melo, 2013).

2.2. SUSTENTABILIDADE NA PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS

A sustentabilidade, segundo Almeida e Melo (2016), introduz uma nova abordagem que integra três dimensões interdependentes: a econômica, a ambiental e a social. Esse conceito, conhecido como "tripé da sustentabilidade" ou "*triple bottom line*", amplia o papel das empresas, que deixam de se concentrar exclusivamente na criação de empregos, na produção de bens e no crescimento

econômico. Agora, elas também precisam assumir responsabilidades sociais e ambientais, garantindo que suas operações contribuam para a proteção do meio ambiente e o bem-estar da sociedade, além de gerar resultados financeiros. Dessa forma, a sustentabilidade passa a ser vista como um equilíbrio entre lucro, preservação ambiental e justiça social. O décimo segundo objetivo de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas, o qual se espera assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis, tem-se como meta, até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais.

A madeira é um dos raros materiais de construção que, além de ser natural, é também renovável, uma vez que está amplamente disponível na natureza. Em particular, as chapas de compensado são fabricadas a partir de árvores de reflorestamento, como o pinus e o eucalipto. Esse processo garante que a produção desse material não coloque em risco as florestas nativas das áreas onde estão localizadas as fábricas, promovendo uma exploração sustentável e controlada dos recursos florestais (Ramos, *et al.*, 2022).

A produção de compensados utiliza, em sua maioria, adesivos sintéticos termorrígidos derivados do petróleo, como aqueles resultantes de reações com formaldeído. No entanto, a sustentabilidade desses materiais e a liberação de formaldeído durante o processo produtivo e no uso final dos produtos são grandes preocupações ambientais e de saúde. Em 2016, a Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC) reclassificou o formaldeído como 'cancerígeno conhecido para humanos', o que levou a um aumento na fiscalização e na regulamentação sobre suas emissões, tanto nos ambientes de trabalho quanto aos produtos finais. Como resultado, a indústria tem buscado alternativas mais sustentáveis para reduzir os impactos ambientais e atender a legislações cada vez mais rigorosas (Hemmila, *et al.*, 2017). Portanto, o formaldeído também tem sido considerado como poluente do ar (Lamaming, *et al.*, 2020).

2.2.1. Regulamentações ambientais e de segurança relacionadas ao uso de formaldeído e resinas fenólicas

A fabricação e o descarte inadequados dos materiais que fazem uso de resinas fenólicas ou a base de formaldeído também podem contaminar o ar e o solo. Como forma de minimizar os riscos, regulamentações nacionais e internacionais

estabelecem limites para a concentração de formaldeído permitida nos produtos. Há ainda esforços para promover o uso de alternativas de baixo VOC (Compostos Orgânicos Voláteis) e de materiais sustentáveis que liberem menos gases tóxicos (ANVISA, 2022).

Segundo o INMETRO (2016) não há uma norma brasileira regulamentadora que limite a emissão de formaldeído em ambientes, sejam eles, residências, hospitais, escolas, etc. Entretanto em ambientes industriais, a norma que rege a exposição é a NR 15 de 06/07/1978, esta estabelece que limite máximo de emissão é de 1,6 ppm / 2,4mg pelo período de 48 horas semanal. A norma estabelece que este limite não pode ser ultrapassado durante a jornada de trabalho.

Referente a regulamentação de limite de emissão de formaldeído proveniente de painéis e compostos de madeira, o qual está relacionado ao uso da resina como ancoragem (Hemmila, et al., 2017), há diferentes categorias de restrição, sendo elas a classe E1 da Europa, a CARB II na Califórnia e a classe F**** no Japão. Estas legislações têm em comum o objetivo de diminuir a emissão, exposição e o risco.

A diretiva (UE) 2010/75 da União Europeia enfatiza a importância de monitorizar as emissões de formaldeído durante a produção e processamento de painéis e compósitos de madeira.

As classes indicam os limites máximos de emissão de formaldeído em painéis de madeira, variando conforme a norma de cada país. A classe é uma categoria usada para definir esse limite, servindo como referência da segurança do material quanto à liberação de formaldeído no ambiente, quanto menor a classe ou o valor, maior a segurança. A classe E1 (Europa) e F★★★★ (Japão) são as mais restritivas, com baixas emissões, enquanto nos EUA os limites são definidos em ppm, como na CARB Fase 2.

A Tabela 1 relaciona as normas vigentes, os métodos, as classes, os valores de emissão de formaldeído e de teor de formaldeído para diferentes tipos de compósitos de madeira.

Tabela 1 - Classe e valor limite superior das emissões de formaldeído para derivados de madeira.

País	Norma	Método	Classe	Tipos de compósito	Valor limite
EUROPA	NP EN 13986	EN 717-1	E1	PB, OSB e MDF (não revestidos)	$\leq 0,124 \text{ mg/m}^3$ ar
		EN ISO 12460-5			$\leq 8 \text{ mg/100 g}$ de placa seca anidra
		EN 717-1			$\leq 0,124 \text{ mg/m}^3$ ar
		EN 12460-3			$\leq 3,5 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}$
JAPÃO	JIS A 5908 & 5905	JIS A 1460	F**	PB, MDF	$\leq 1,5 \text{ mg/L}$
			F***		$\leq 0,5 \text{ mg/L}$
			F****		$\leq 0,3 \text{ mg/L}$
EUA	ANSI	ASTM E1333 (câmara grande)	Fase 2	PB, MDF	$\leq 0,3 \text{ ppm}$
	A208.1&2			PW	$\leq 0,2 \text{ ppm}$
	CARB	ASTM E1333		PB	0,09 ppm
				MDF	0,11 ppm

Fonte: Adaptada de Gonçalves *et al.* (2017)

As normas NP EN 13986, JIS A 5908/5905, ANSI A208.1/A208.2 e CARB estabelecem diferentes limites para as emissões de formaldeído em produtos de madeira, visando proteger a saúde e o meio ambiente. A NP EN 13986, utilizada na Europa, classifica os materiais em E1 e E2, sendo que E1 permite uma emissão máxima de 0,1 ppm (0,124 mg/m³ no ar) e é amplamente aceita para uso interno, enquanto a classe E2, com emissões superiores, requer controles adicionais. No Japão, as normas JIS A 5908 e 5905 diferenciam níveis de formaldeído, com destaque para a classe F****, que autoriza emissões de até 0,3 mg/L, atendendo às regulamentações mais rígidas do país. Nos Estados Unidos, as normas ANSI A208.1 e A208.2 determinam limites variados para painéis de partículas e MDF, com um máximo de 0,3 ppm para garantir a segurança em ambientes internos. A CARB (*California Air Resources Board*) adota uma das regulamentações mais restritivas do mundo, exigindo emissões abaixo de 0,09 ppm para painéis de partículas e 0,11 ppm para MDF, influenciando o setor global a adotar padrões mais seguros. Essas normas buscam reduzir os riscos associados à exposição prolongada ao

formaldeído, como irritações respiratórias e câncer, e impulsionam o desenvolvimento de produtos de baixo VOC e alternativas mais sustentáveis.

2.2.2. Problemas relacionado ao uso de formaldeído

O formaldeído é produzido naturalmente por organismos vivos e ocorre no meio ambiente. Alimentos como frutas, vegetais, laticínios, carnes, peixes e moluscos podem conter pequenos detalhes dessa substância, sem oferecer riscos à saúde. No entanto, a exposição a altos níveis de formaldeído pode ser tóxica e está associada a riscos de intoxicação e desenvolvimento de câncer, especialmente em contextos de exposição ambiental ou ocupacional prolongada (INCA, 2024).

O uso de formaldeído na produção de painéis de madeira, compensados e laminados representa riscos importantes à saúde e ao meio ambiente, como contaminante do solo e do ar, devido à liberação contínua desse composto. As resinas sintéticas de fenol-formaldeído utilizadas no processo emitem gases ao longo do tempo, esse fenômeno, conhecido como *off-gassing*, pode ocorrer por anos, liberando formaldeído no ar em ambientes fechados. Segundo a Anvisa a exposição ao formaldeído pode causar irritação nos olhos, nariz e garganta, além de problemas respiratórios, como tosse e dificuldade para respirar. A Agência Internacional para Pesquisa em Câncer (IARC) classifica o formaldeído como uma substância cancerígena, associada a um maior risco de câncer nas vias respiratórias superiores, como laringe e traqueia. Em pessoas sensíveis, ele pode desencadear crises alérgicas e piorar sintomas de asma, além de causar dores de cabeça e desconforto geral.

2.3. COMPOSTOS FENÓLICOS

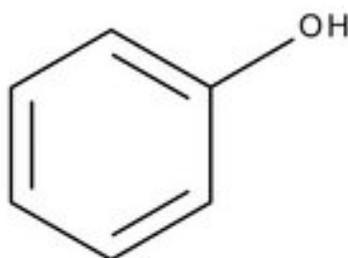
O fenol foi isolado pela primeira vez em 1834 pelo químico alemão Friedlieb Ferdinand Runge, que o obteve ao destilar alcatrão de hulha. Inicialmente, ele chamou o composto de "ácido carbólico". Durante essa fase, o fenol era considerado um subproduto da produção de gás e carvão. Após a Segunda Guerra Mundial, no início do Século XX, houve aumento da demanda na indústria de resinas fenólicas, neste momento o fenol era produzido majoritariamente por técnicas que envolviam a cloração ou a sulfonilação do benzeno. Atualmente o principal método de obtenção

do fenol é através da rota de oxidação do cumeno e a principal empresa responsável por esta rota no Brasil é a multinacional Francesa Rhodia, com planta exclusiva para a produção de fenol em Paulina/SP (Oliveira, 2015).

Além da obtenção do fenol de forma sintética, os compostos fenólicos são amplamente encontrados em plantas e formam um grupo diversificado de fitoquímicos originados da fenilalanina e tirosina. Em vegetais possui papel de atuação como agentes de defesa contra patógenos e contribuem para a pigmentação. Nos alimentos, esses compostos influenciam na tonalidade, adstringência, aroma e estabilidade oxidativa. Os compostos fenólicos presentes nas plantas apresentam uma grande diversidade estrutural, incluindo ácidos fenólicos, derivados de cumarina, taninos e flavonoides (Ferrera, *et al.*, 2016).

Os compostos fenólicos são definidos quimicamente como substâncias que possuem ao menos um anel aromático com um ou mais grupamentos hidroxílicos, a sua estrutura molecular pode variar entre uma molécula fenólica a polímeros complexos de elevada massa molar (Oliveira, 2015). A estrutura molecular do fenol está apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Estrutura molecular do fenol.



Fonte: Adaptado de Burdick e Leffler, 2001.

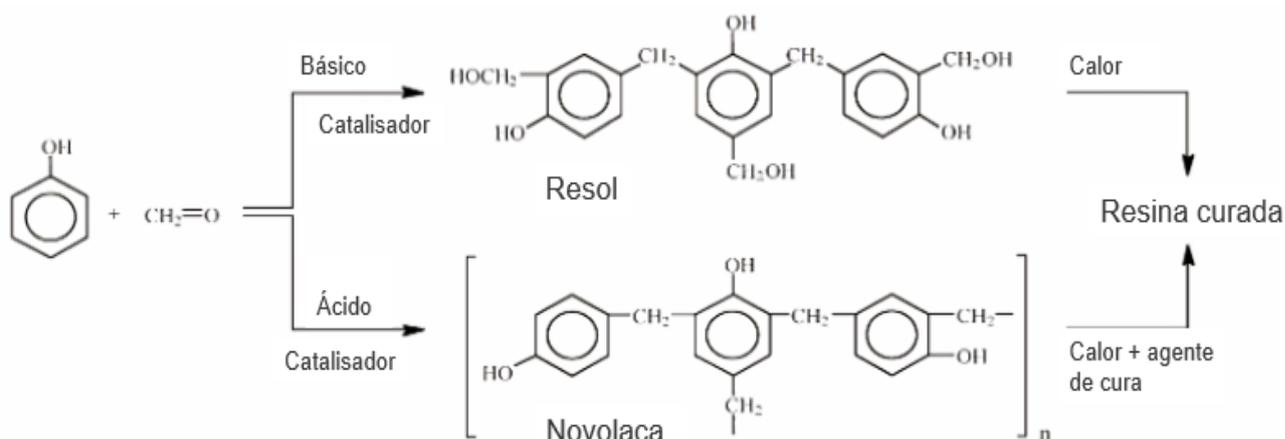
O fenol é uma substância orgânica que quando em estado sólido se encontra em estado cristalino, possui odor característico e alta volatilidade. A fórmula molecular do fenol é C_6H_6O e seu peso molecular é de $94,1 \text{ g.mol}^{-1}$ (Ferrera, *et al.*, 2016).

2.3.1. Resina fenol-formaldeído

A resina fenólica, também conhecida como resina de fenol-formaldeído, é um polímero sintético resultante da reação entre fenol (C_6H_5OH) e formaldeído

(CH₂O). Foi uma das primeiras resinas sintéticas desenvolvidas e é amplamente utilizada devido à sua resistência térmica, química e mecânica. Sua produção envolve uma reação de condensação entre os dois reagentes, podendo resultar em dois tipos principais de resinas: novolaca e resol (Gonçalves, *et al.*, 2021), conforme a Figura 7.

Figura 7 - Obtenção de resina resol-novolaca.



Fonte: Adaptado de Delgado, *et al.*, 2024.

Os resóis são variantes de resinas fenólicas que surgem da combinação de fenol com um excesso de formaldeído, utilizando um catalisador alcalino, como hidróxido de sódio ou amônia. A relação típica entre fenol e formaldeído nessa síntese varia de 1:1 a 1:1,3. Essas resinas apresentam ramificação moderada e peso molecular relativamente baixo, o que lhes confere solubilidade em água. Embora tenham uma vida útil limitada, geralmente de alguns meses, os resóis são considerados resinas fenólicas de "uma etapa", pois não necessitam de agentes de cura adicionais. O processo de cura ocorre por meio da polimerização térmica em temperaturas que variam entre 130 e 200 °C, com a liberação de água como subproduto (Delgado, *et al.*, 2024). A principal aplicação dessas resinas é na indústria madeireira.

Ainda conforme Delgado, *et al.*, (2024) as resinas novolacas são outro tipo de resina fenólica, obtidas através de uma reação com uma quantidade reduzida de formaldeído, onde a proporção fica entre 0,75 e 0,85 mol por cada mol de fenol. Nesse estado inicial, as resinas novolacas possuem propriedades termoplásticas e precisam da adição de um endurecedor, como a hexametilenotetramina (HMTA),

para que os produtos resultantes sejam resistentes ao calor e se tornem insolúveis e infusíveis

Em 2019, o mercado de resina fenólica foi avaliado em US\$ 12,63 bilhões. As projeções indicam que esse valor alcançou cerca de US\$ 15 bilhões em 2021. O principal setor consumidor dessa resina é sua utilização como adesivo para madeira, beneficiada pelo crescimento da indústria da construção civil, que atua como o principal motor desse aumento. Dentro desse segmento, a fabricação de Painéis de Madeira Laminada (PLW) representa a maior participação no mercado de adesivos para madeira. No entanto, o crescimento do mercado de resinas fenólicas enfrenta alguns desafios, como a volatilidade dos preços do petróleo bruto, que é a principal matéria-prima utilizada na produção dessas resinas (Gonçalves, *et al.*, 2021).

2.3.2. Alternativas de resinas a base de componentes naturais

Para atender às rigorosas regulamentações sobre as emissões de formaldeído, diversas alternativas têm sido pesquisadas e desenvolvidas como substitutas às resinas sintéticas à base de formaldeído na fabricação de painéis de madeira. Essas alternativas não apenas visam reduzir os níveis de formaldeído liberados na atmosfera, mas também buscam manter a qualidade e durabilidade dos produtos finais (Hemmilä, *et al.*, 2017).

Das alternativas que vem sendo estudadas, umas delas é a utilização de matérias-primas sustentáveis no processo de produção de painéis de madeira, com a finalidade de reduzir a utilização de matérias que contribuem para a redução de emissão de compostos perigosos e voláteis. Adesivos de origem biológica têm sido empregados há milênios. Contudo, o uso tradicional desses adesivos frequentemente enfrenta desafios relacionados à sua estabilidade em ambientes úmidos e molhados. Essa instabilidade característica pode afetar negativamente as propriedades físicas e mecânicas dos painéis, resultando em uma diminuição da resistência mecânica e da durabilidade do produto final (Gonçalves, *et al.*, 2021).

A utilização de ingredientes naturais, como proteína de soja, lignina e taninos, na produção de adesivos oferece uma alternativa sustentável e menos prejudicial. Esses materiais não só diminuem a dependência de compostos químicos sintéticos, mas também podem aprimorar as características adesivas e mecânicas dos produtos finais. Dentro do contexto do desenvolvimento de sistemas de resina

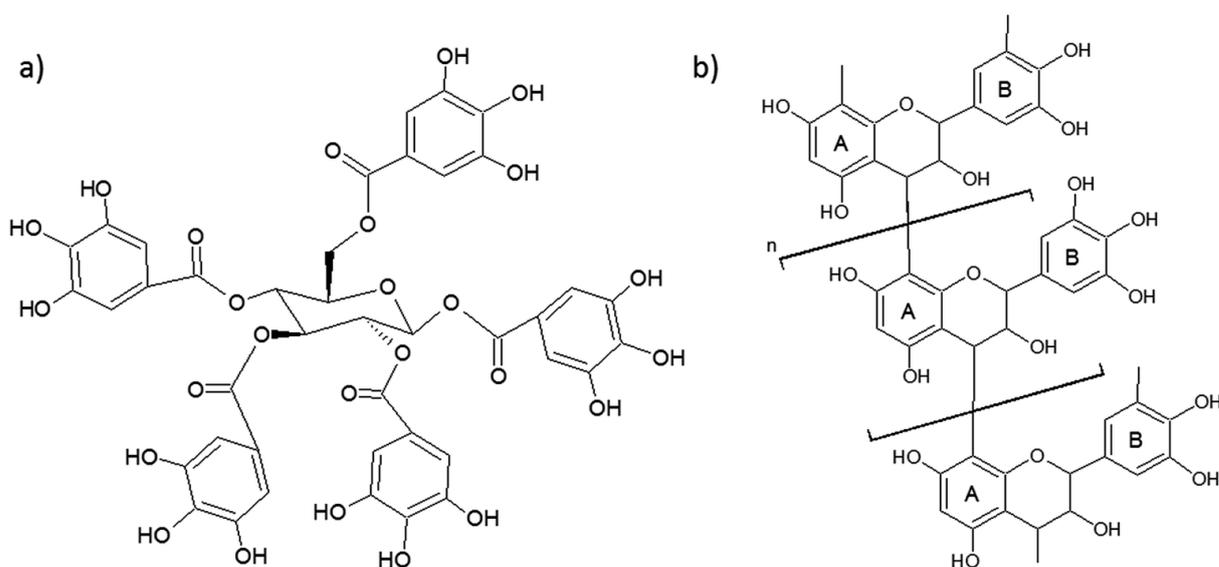
isentos de formaldeído, o tanino se destaca como uma das matérias-primas mais investigadas. Isso se deve às suas estruturas químicas fenólicas adequadas, à sua renovabilidade e à sua elevada reatividade (Oktay, *et al.*, 2024).

2.4. TANINOS

Os taninos são compostos fenólicos que desempenham um papel importante na defesa e proteção das plantas. Sua presença confere um gosto amargo e adstringente, o que ajuda a proteger frutos, sementes e casca contra o ataque de animais e agentes patogênicos, em sua maioria em leguminosas e coníferas (Santos, *et al.*, 2017; Filgueira, *et al.*, 2017). Apesar de ser encontrado em diversas plantas, a concentração do tanino é bastante variável, essa depende da idade da planta, estrutura e local onde está plantada. Das principais árvores em que se pode extrair tanino são quebracho, carvalho, castanheiro, acácia, eucalipto, murta, bordo, bétula e salgueiro (Hemmilä, *et al.*, 2017).

Os taninos são considerados compostos fenólicos por possuírem em sua estrutura grande quantidade de anéis fenólicos, suas massas molares variam entre 500 a 3000 g/mol. Quimicamente, os taninos são divididos em duas categorias: hidrolisáveis e condensados. Os taninos hidrolisáveis contêm monômeros de ácido gálico ou ácido elágico, enquanto os condensados são polifenóis com massa molecular variável, formados por unidades flavonoides, como flavan-3-ol e flavan-3,4-diol, apresentando diferentes graus de condensação (Oktay, *et al.*, 2024). As estruturas químicas dos dois diferentes tipos de taninos, podem ser observadas na Figura 8.

Figura 8 - (a) Tanino hidrolisável e (b) tanino condensado.



Fonte: Hemmilä, *et al.*, 2017.

Os taninos condensados da acácia são obtidos através de um processo que envolve a remoção com água quente ou soluções levemente ácidas, removendo os compostos fenólicos presentes nas cascas ou na madeira da planta. O material é primeiramente triturado para aumentar a área de contato e, em seguida, submetido a uma remoção sob condições controladas de temperatura e tempo, maximizando o rendimento dos taninos. A mistura obtida é filtrada e equipamentos para eliminar o excesso de água, resultando em um extrato concentrado de taninos. Este extrato é, então, seco por processos como a atomização, gerando um pó, mostrado na Figura 9 (Shirmohammadli, *et al.*, 2018).

Figura 9 - Extrato de tanino em pó.



Fonte: SETA.

O tanino em pó é amplamente utilizado em aplicações industriais, como fabricação de adesivos, curtimento de couro, preservação de madeira, purificação de água, onde é utilizado como floculante natural, e na indústria farmacêutica, devido às suas propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias (Hemmilä, *et al.*, 2017).

2.4.1. Resinas a base de taninos

Desde a década de 1970 os taninos condensados, como os extraídos de quebracho e acácia, vêm sendo utilizados na síntese de adesivos, devido às características de sua estrutura química. Atualmente estes taninos representam 90% do mercado mundial de taninos (Filgueira, *et al.*, 2017). Formados pela polimerização de unidades monoméricas de flavanol, os taninos condensados apresentam grupos hidroxila fenólicos, o que garante alta reatividade. Essa reatividade é atribuída aos núcleos de resorcinol e floroglucinol presentes em sua composição estrutural (Hemmilä, *et al.*, 2017). A reação entre o fenol-tanino e formaldeído possui velocidade de 10 a 50 vezes mais rápida que a reação entre fenol-sintético e formaldeído, desta forma, adesivos a base de taninos fariam uso de maior quantidade de formaldeído em sua composição, segundo Ghahri e Pizzi (2018).

A eficiência do tanino e de seus derivados, como adesivos, depende de diversas condições durante a etapa de extração. Fatores como o solvente aplicado, a temperatura e a duração do processo, o pH, a espécie vegetal utilizada e a finalidade do produto final influenciam diretamente sua qualidade. O tanino extraído da acácia destaca-se por sua compatibilidade com o fenol-formaldeído (PF) e representa a principal fonte de tanino utilizada globalmente (Shirmohammadli, *et al.*, 2018).

As propriedades térmicas dos adesivos à base de tanino podem ser similares às dos fenólicos, devido à sua estrutura polifenólica compatível com a do fenol. A análise do comportamento de cura e das características térmicas das resinas a base de tanino é essencial para a aplicação em painéis de madeira, isso pois, está relacionada as propriedades mecânicas do adesivo, tal como a sua estabilidade altas temperaturas (Hafiz, *et al.*, 2020).

Em 2020, Arias *et al.* conduziram uma pesquisa com finalidade de avaliar o impacto das resinas à base de tanino no meio ambiente. A pesquisa fez análise do ciclo de vida (ACV), o qual levou em consideração os processos de produção

dessas resinas. Este estudo teve como resultado que essas resinas apresentam um desempenho ambiental mais favorável em comparação com as resinas de origem fóssil, destacando-as como uma alternativa sustentável e promissora para a indústria de painéis de madeira.

2.4.2. Uso de resina a base de tanino para produção de painéis

Nath, *et al.*, (2018) conduziram um estudo no qual analisaram diferentes formulações de ureia-formaldeído e adesivo à base de tanino extraído da casca de *Ceriops decandra* (Griff.), uma espécie típica de manguezais, na fabricação de painéis. Os painéis colados com adesivo 100% à base de tanino apresentaram as melhores propriedades mecânicas. Embora o desempenho do adesivo puro tenha sido satisfatório e eficaz, os autores destacaram a necessidade de testar outras formulações combinando tanino com resina Ureia-Formaldeído para aprimorar o controle do inchaço em espessura e elevar o valor do módulo de elasticidade (MOE).

O estudo realizado por Hafiz, *et al.*, (2020), explorou a extração de tanino da casca de *Acacia mearnsii* e sua copolimerização com resina fenol-formaldeído (PF) para aplicação como adesivo na fabricação de compensado. A adição do tanino mostrou-se viável em baixas temperaturas (50°C) sob alta velocidade de cisalhamento, resultando em uma resina com cura mais rápida, estabilidade térmica superior e força de ligação quase comparável à do PF puro. Entre as formulações, o PF com 30% em massa de substituição por tanino apresentou o melhor desempenho, com menor temperatura de cura, maior estabilidade térmica e alta resistência ao cisalhamento, superando o mínimo exigido pela norma EN314.

No estudo conduzido por Oktay, *et al.*, (2024), foram analisadas várias formulações de resinas que utilizam tanino como base. As resinas de tanino reticuladas foram criadas com a adição de agentes de reticulação, como hexamina e furfural, enquanto as resinas híbridas de tanino foram elaboradas a partir de outros recursos biológicos, como amido e lignina. O desempenho dessas formulações foi avaliado com foco nas propriedades mecânicas e físicas dos produtos, incluindo chapas de partículas (*particleboard*) e compensados (*plywood*). As vantagens e desvantagens de cada tipo de resina foram analisadas em detalhes, levando em consideração o desempenho dos produtos acabados. Os resultados indicaram que as resinas biológicas sintetizadas com tanino, sem a presença de formaldeído,

apresentam potencial para rivalizar com as resinas convencionais à base de formaldeído.

Souza, *et al.*, (2020) avaliaram a colagem de compensados com adesivo à base de taninos de *Acacia mangium* Wild, cultivada no Nordeste do Brasil, comparando seu desempenho adesivo com dois adesivos comerciais. O adesivo à base de tanino foi formulado através da mistura do extrato de tanino à resina fenol-formaldeído. Com base nos resultados obtidos, no que se refere às propriedades mecânicas, não houve diferença estatisticamente significativa entre o adesivo à base de taninos de *A. mangium* e os adesivos comerciais. Contudo, com base na análise de absorção de água, verificou-se que os painéis colados com taninos de *A. mangium* apresentaram maior absorção, sendo mais indicados para uso em ambientes internos devido a essa característica.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram avaliados painéis compensados LVL utilizando resina a base de tanino com diferentes proporções de mistura. As características físico-químicas foram avaliadas comparativamente com painéis compensados LVL utilizando resinas fenol-formaldeído.

A empresa Tramontina Cutelaria, localizada em Carlos Barbosa, disponibilizou o espaço do laboratório CIPED (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento) para a produção dos painéis, preparo das soluções de impregnação e realização dos ensaios de propriedades físicas, químicas e mecânicas das amostras.

3.1. MATERIAIS

As lâminas de madeira utilizadas para a montagem dos painéis de compensado são de *Pinus elliottii*, com dimensões de 15 x 15 cm e 1,2 mm de espessura, estas lâminas foram preparadas pelo fornecedor Laminados Redentora, sendo torneadas e secas em estufa de esteira roletada aquecida a vapor a aproximadamente 120°C, a fim de que sua umidade atinja no máximo 14%, este percentual é definido com a finalidade de melhorar a absorção da solução no momento da impregnação, isto pois, quanto maior a umidade, mais água terá no interior da madeira, impedindo que a solução penetre na mesma (Augustina, *et al.*, 2019).

O tanino obtido para estudo foi adquirido pela empresa SETA, a qual é especialista em extratos de tanino de Acácia-Negra (*Acacia mearnsii*). Foram obtidas duas amostras de extrato de tanino em pó, ambas são de tanino condensado, uma das amostras trata-se de tanino natural e a outra de tanino modificado, o qual há bloqueio das hidroxilas, evitando que a resina forme ligações de hidrogênio intermoleculares (Shirmohammadli, *et al.*, 2018). A resina que foi utilizada na formulação dos adesivos é a Resilack AD 1402 a base de fenol-formaldeído. As características dos taninos e da resina estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características dos taninos e resina utilizados na formulação de solução para impregnação.

Características	Tanino natural	Tanino modificado	Resina Fenólica
Aspecto	Pó castanho	Pó castanho	Líquido avermelhado
pH	4,5 - 5,5	4,5 - 5,5	8,3 – 9,3
Viscosidade	-	-	~ 400 cP
Massa específica	0,55 g/cm ³	0,55 g/cm ³	1,240 g/cm ³

Fonte: Autor, 2025.

3.2. PREPARAÇÃO DE SOLUÇÃO PARA IMPREGNAÇÃO

Para a impregnação das lâminas de madeira, foram preparadas diferentes formulações para avaliação da substituição da resina fenol-formaldeído pelo tanino natural, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Formulação de solução para impregnação das lâminas de madeira.

Amostra	% resina fenólica (R)	% tanino natural (TN)	% tanino modificado (TM)	% água
TN50	-	50	-	50
R15TN35	15	35	-	50
R25TN25	25	25	-	50
R35TN15	35	15	-	50
TM50	-	-	50	50
R15TM35	15	-	35	50
R25TM25	25	-	25	50
R35TM15	35	-	15	50
R50	50	-	-	50

Fonte: Autor, 2025.

Foi determinada a massa específica de cada uma das soluções preparadas, para isso foi utilizado um densímetro calibrado a 21°C seguindo a Norma ASTM D1298.

3.3. PRODUÇÃO DOS PAINÉIS

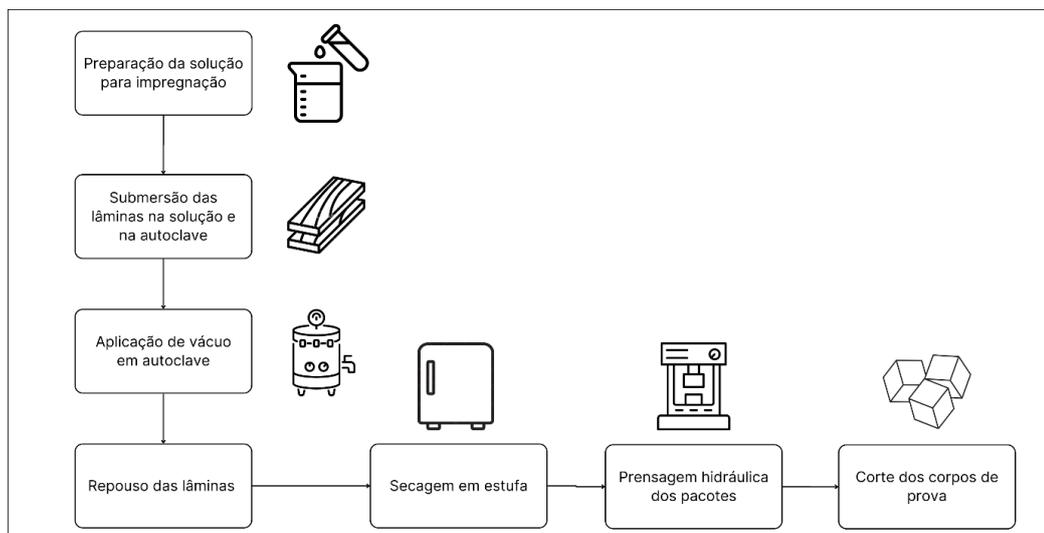
Para produzir os painéis, foram selecionadas 10 lâminas de madeira para compor cada pacote. O primeiro processo realizado foi a impregnação das lâminas em autoclave de bancada, construída pela empresa. Cada conjunto de 10 lâminas foi disposto em recipientes distintos, sendo que cada recipiente continha uma solução específica. As lâminas foram completamente submersas nessas soluções, e os recipientes foram então colocados dentro da autoclave. Com o sistema fechado, aplicou-se um vácuo de aproximadamente 0 bar ao equipamento, pelo período de 1 hora a temperatura ambiente ($\sim 20^{\circ}\text{C}$).

Após a impregnação as lâminas foram deixadas em repouso pelo período de 48 horas, em local seco e à temperatura ambiente ($\sim 20^{\circ}\text{C}$) a fim de promover melhor absorção da solução (Augustina, *et al.*, 2023). Após o período as lâminas foram secas em estufa com circulação de ar, modelo CR/150 da Sterilifer, a 120°C , até atingirem um teor de umidade entre 9 e 6%, requisito essencial para o processo de prensagem a quente das chapas. A umidade foi controlada através de medidor de umidade específico para madeiras do modelo MWD-14^a da Minipa.

Com as lâminas secas foram montados os pacotes para formação dos painéis, compostos de 10 lâminas dispostas paralelas umas às outras. Para o ciclo de moldagem dos painéis, foi utilizada uma prensa hidráulica com pratos planos horizontais e aquecimento a vapor, também construída pela empresa. Os pacotes foram prensados com uma curva de pressão que atinge até 130 kgf/cm^2 , com elevação da temperatura até 150°C , pelo período de aproximadamente 40 minutos (Gonçalves, *et al.*, 2021).

Ressalta-se que a umidade entre 9 a 6% das lâminas é crucial, pois valores acima disso favorecem a evaporação excessiva durante a prensagem, comprometendo a união entre as lâminas. O processo realizado até o corte dos corpos de prova está representado na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma de processo de preparação dos corpos de prova.



Fonte: Autor, 2025.

3.4. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS PAINEIS

Os ensaios físicos e mecânicos realizados neste trabalho foram: Massa Específica Aparente, Inchamento em Espessura (IE) e Absorção de Água (AA) fervente pelo período de 1 hora, resistência à flexão estática (Módulo de Ruptura – MOR e Módulo de Elasticidade – MOE perpendicular à direção longitudinal).

3.4.1. Determinação da massa específica aparente

A determinação da massa específica aparente dos painéis foi realizada conforme o método descrito na norma ASTM D 1037, em triplicata. Para isso, foram preparados corpos de prova quadrados. As dimensões de cada corpo de prova, largura, comprimento e espessura, foram medidas com auxílio de um paquímetro, a fim de calcular o volume individual de cada amostra, conforme a Equação 1.

$$V = \frac{L \times C \times E}{10^9} \quad (1)$$

Onde:

V = Volume (cm³)

L = Largura (mm)

C = Comprimento (mm)

E = Espessura (mm)

A massa de cada corpo de prova foi obtida em uma balança analítica. Obtendo a massa e do volume, foi calculada a massa específica aparente de cada amostra, utilizando a Equação 2.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Onde:

ρ = massa específica aparente (g/cm³)

m = massa seca da amostra (g)

V = volume da amostra (cm³)

3.4.2. Ensaio de absorção de água

A fim de obter o percentual de absorção de água foi realizado uma adaptação do método ASTM D 1037 em triplicata, realizando a pesagem dos corpos de prova, com dimensional de 30 mm x 30 mm, após foram deixados imersos em água fervente pelo período de 1 hora, e posteriormente foram pesados novamente. A absorção de água após 1 hora de imersão foi calculada de acordo com a Equação 3:

$$AA = \frac{(MF - MI)}{MI} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

AA = Absorção de água (%)

MF = Massa final (g)

MI = Massa inicial (g)

3.4.3. Ensaio de inchamento em espessura

Para a determinar o Inchamento em Espessura (IE), foi realizado uma adaptação do método ASTM D 1037 em triplicata, foi marcado um ponto em cada corpo de prova, com dimensional de 30 mm x 30 mm, acerca do centro de cada amostra, e medido a espessura em cada um destes pontos. A seguir, os corpos de prova foram imersos em água fervente pelo período de 1 hora e medidos novamente. O Inchamento em Espessura após 1 hora foi calculado de acordo com a Equação 4:

$$IE = \frac{(EF - EI)}{EI} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

IE = Inchamento em espessura (%)

EF = Espessura final (cm)

EI = Espessura inicial (cm)

3.4.4. Ensaio de flexão estática (MOR e MOE)

Para avaliar a resistência mecânica do material, foram realizados ensaios de flexão estática em triplicata, na máquina universal de ensaios Quasar da Galdabini com capacidade de 100 kN, com adaptações para atender às especificações da norma COPANT 555. Os corpos de prova, com dimensões de 100 mm x 50 mm, foram posicionados sobre um suporte com 80 mm de vão, e a carga foi aplicada no centro da amostra a uma velocidade de 5 mm/min. A escolha dessa velocidade foi uma adaptação baseada nas orientações da COPANT 555, que recomenda uma aplicação controlada da carga para garantir medições precisas. A norma sugere que a velocidade de deformação seja gradual, assegurando que o tempo de ruptura seja mantido entre 60 e 120 segundos, refletindo as condições reais de uso do material. Através do deslocamento e da carga máxima registrada para cada corpo de prova, foi calculado o módulo de ruptura (MOR) conforme a Equação 5:

$$MOR = \frac{3 \times F_{\text{máx}} \times L}{2 \times l \times e^2} \quad (5)$$

Onde:

MOR = Módulo de ruptura (N/mm²);

F_{máx} = Carga máxima (N);

L = Comprimento do vão (cm);

l = Largura real da amostra (cm);

e = Espessura real da amostra (cm).

O cálculo do MOE foi realizado conforme a Equação 6:

$$MOE = \frac{F_{\text{máx}} \times L^3}{4 \times l \times e^2 \times \delta} \quad (6)$$

Onde:

MOE = Módulo de elasticidade (N/mm²);

F_{máx} = Carga máxima (N);

L = Comprimento do vão (mm);

l = Largura real da amostra (mm);

e = Espessura real da amostra (mm);

δ = Deslocamento (mm).

3.4.5. Análise de morfologia

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite avaliar a superfície e interface em um nível micrométrico e submicrométrico, fornecendo informações úteis sobre a morfologia, a adesão e a distribuição dos materiais.

Com as micrografias obtidas foi possível avaliar a uniformidade da aplicação da cola, a penetração nas fibras da madeira e possíveis defeitos ou falhas de adesão (Scheeren, et al., 2020). As micrografias foram obtidas no Laboratório Central de Microscopia da UCS utilizando o microscópio eletrônico de varredura emissão de campo (MEV-FEG) marca Tescan modelo FEG Mira 3 com uma tensão de aceleração de 10 kV, em amostras dos painéis previamente recobertas com ouro.

A fim de identificar os elementos químicos presentes em cada amostra, foi realizado a análise de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). Essa técnica permite a detecção de elementos químicos com número atômico superior a três, sendo amplamente utilizada em análises de materiais lignocelulósicos modificados (Zhang, et al., 2019).

3.4.6. Ensaio de extração de Formol e Fenol

Para avaliar as concentrações de formaldeído e fenol nas amostras de painéis de madeira, foi realizado um ensaio baseado em uma adaptação do método de extração conhecido como “método do perfurador”, conforme descrito na norma europeia EM 120:1992, no laboratório da empresa Tramontina. Essa norma especifica um método de extração para determinar o teor de formaldeído em painéis de madeira não revestidos.

No procedimento adaptado, aproximadamente 5 gramas de cada amostra foram pesadas e colocadas em erlenmeyers, aos quais foram adicionados 200 mL

de água destilada e algumas pérolas de vidro para facilitar a ebulição. Os erlenmeyers foram conectados a condensadores de refluxo e submetidos à fervura por 2 horas e 30 minutos, permitindo a extração dos compostos presentes nas amostras.

Após a extração, foram adicionados reagentes específicos do kit de identificação de fenol e formaldeído da Merck às soluções obtidas. As concentrações de formaldeído e fenol foram então determinadas por espectrofotometria utilizando o equipamento Spectroquant Prove 300 UV/VIS da marca Merck.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA SOLUÇÃO

A massa específica de cada uma das soluções preparadas foi medida com o objetivo de avaliar seu potencial de impregnação no interior da madeira. Esse parâmetro está diretamente relacionado à capacidade de penetração da solução nos poros do material, uma vez que, quanto maior a massa específica, maior tende a ser a dificuldade de penetração (Augustina, *et al.*, 2019). Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Massa específica das soluções estudadas

Identificação	Massa específica (g/cm ³)
TN50	1,24 +/- 0,0
R15TN35	1,11 +/- 0,0
R25TN25	1,13 +/- 0,0
R35TN15	1,11 +/- 0,0
TM50	1,20 +/- 0,0
R15TM35	1,16 +/- 0,0
R25TM25	1,15 +/- 0,0
R35TM15	1,13 +/- 0,0
R50	1,09 +/- 0,0

Fonte: Autor, 2025.

Todas as soluções preparadas apresentaram massa específica superior à da solução padrão (Amostra R50), composta apenas por água e resina fenólica. Observou-se que, conforme o percentual de tanino na solução diminui, a massa específica também reduz, indicando uma relação direta entre a concentração de tanino e a massa específica da solução.

Esse comportamento está alinhado com a literatura, que caracteriza os taninos como compostos polifenólicos de origem vegetal, com massas molares variando entre 1200 a 3000 g/mol. Sua estrutura química é rica em grupos funcionais polares, conferindo-lhes alta polaridade e capacidade de formar ligações de hidrogênio com moléculas de água (Morais, 2019). Essas interações resultam em soluções mais densas quando comparadas àquelas contendo apenas resina fenólica

e água. As resinas fenólicas, como as do tipo resol, possuem massas molares relativamente baixas, geralmente variando entre 300 e 1500 g/mol, dependendo do grau de polimerização e das condições de síntese (Borges, 2004). Mesmo com o bloqueio parcial das hidroxilas no tanino modificado, não foi possível verificar diferença entre a massa específica, quando comparada com o tanino natural.

Além disso, o aumento da massa específica das soluções contendo tanino pode influenciar negativamente a penetração do líquido nas fibras da madeira durante o processo de impregnação. Soluções mais densas tendem a dificultar a difusão e a absorção nas estruturas celulares, o que pode impactar diretamente a eficiência do tratamento (Monteiro, *et al.*, 2005).

4.2. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PAINÉIS

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos através da determinação da massa específica dos painéis, do ensaio de absorção de água e de inchamento em espessura. A amostra R50, sem adição de tanino, pode-se considerar o valor referência para comparativo com as demais amostras.

Tabela 5 – Resultados das propriedades físicas dos painéis

Identificação	Massa específica (g/cm³)	Absorção de água (%)	Inchamento em espessura (%)
TN50	1,35 +/- 0,004	-	-
R15TN35	1,29 +/- 0,003	7,46 +/- 0,29	13,95 +/- 1,97
R25TN25	1,17 +/- 0,053	5,05 +/- 0,30	7,83 +/- 1,50
R35TN15	1,15 +/- 0,065	2,67 +/- 0,32	3,50 +/- 0,70
TM50	1,34 +/- 0,053	-	-
R15TM35	1,30 +/- 0,060	7,92 +/- 2,73	14,12 +/- 2,87
R25TM25	1,38 +/- 0,008	2,21 +/- 0,11	3,81 +/- 0,76
R35TM15	1,32 +/- 0,063	1,84 +/- 0,37	2,86 +/- 0,55
R50	1,13 +/- 0,063	2,34 +/- 0,77	1,89 +/- 0,01

Fonte: Autor, 2025.

As amostras TN50 e TM50, impregnadas com soluções contendo exclusivamente tanino diluído em água, apresentaram baixa resistência à umidade, atribuída à elevada quantidade de grupos hidroxila por molécula de tanino, o que

intensifica o caráter hidrofílico das formulações. Durante o ensaio de absorção de água e inchamento em espessura, foi observado o descolamento das lâminas dos corpos de prova, evidenciando falhas na integridade estrutural do material. Adicionalmente, a água utilizada no ensaio adquiriu uma coloração escura, semelhante à da solução de impregnação, indicando a lixiviação do tanino durante o teste.

Esse fenômeno sugere que, mesmo com o bloqueio parcial das hidroxilas no tanino modificado, não houve melhora significativa na resistência à umidade quando o tanino é utilizado como substituto completo da resina fenólica. Devido a essas ocorrências, não foi possível determinar os valores de absorção de água e inchamento em espessura para essas amostras.

Esse comportamento também foi observado em estudos anteriores, demonstrando que a substituição total de resinas sintéticas por taninos pode comprometer a estabilidade dimensional dos painéis de madeira, especialmente em ambientes úmidos. De acordo com Souza, *et al.*, (2020), painéis colados com adesivo à base de taninos de *Acacia Mangium* apresentaram maiores valores de absorção de água após 2 e 24 horas de imersão, em comparação aos painéis colados com adesivo fenólico comercial. A lixiviação do tanino em amostras de madeira tratadas com soluções aquosas ocorre devido à ausência de reações químicas que fixem o tanino à estrutura da madeira. Sendo compostos hidrossolúveis, os taninos tendem a ser removidos pela água, especialmente quando não são previamente modificados ou combinados com agentes de fixação.

Conforme as normas em 13986 e ABNT NBR 14810, os painéis de madeira são classificados em categorias de massa específica. Dependendo da classificação, diferentes propriedades são exigidas dos materiais. A Tabela 6 relaciona a massa específica dos painéis com as respectivas classificações.

Tabela 6 - Classificação dos painéis conforme a massa específica.

Categoria	Massa específica (g/cm³)
Baixa massa específica	< 0,45
Média massa específica	0,45 – 0,80
Alta massa específica	> 0,80

Fonte: Adaptação das normas EN 13986 e ABNT NBR 14810.

Com base na classificação estabelecida pelas normas técnicas, todas as amostras analisadas se enquadram como painéis de alta massa específica, ou seja, com massa específica superior a $0,80 \text{ g/cm}^3$. Embora não exista uma norma específica voltada exclusivamente para painéis de madeira de alta massa específica, os limites de absorção de água e inchamento em espessura são definidos por normas como a EN 622-5:2009, que trata de painéis de fibras de madeira. Segundo essa referência, para garantir a estabilidade dimensional e a resistência à umidade em aplicações internas ou sob condições de umidade moderada, os painéis devem apresentar inchamento em espessura de no máximo 6% após 24 horas de imersão em água, e absorção de água não superior a 25–30%.

Considerando esses critérios, observou-se que as amostras R25TN25, R35TN15, R25TM25, R35TM15 e R50 apresentaram desempenho físico compatível com os limites normativos, demonstrando menor sensibilidade à umidade e maior integridade estrutural. As demais amostras, por apresentarem falhas significativas, como delaminação, lixiviação de componentes ativos ou valores superiores aos limites estabelecidos, foram desconsideradas para as próximas etapas de avaliação. Dessa forma, os ensaios subsequentes serão realizados exclusivamente com as amostras R25TN25, R35TN15, R25TM25, R35TM15 e R50, por atenderem aos requisitos de desempenho físico exigidos para aplicações que demandam resistência à umidade.

4.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS

A fim de avaliar a resistência a flexão estáticas foi realizado o cálculo para determinação do módulo de ruptura e o de elasticidade, os resultados médios estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados dos testes de flexão estática.

Identificação	F_{máx} (N)	δ (mm)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
R25TN25	2656 +/- 282	3,48 +/- 0,81	255,01 +/- 27	16197 +/- 2482
R35TN15	1986 +/- 281	4,05 +/- 0,41	190,66 +/- 27	10129 +/- 1648
R25TM25	2151 +/- 46	4,82 +/- 0,21	206,50 +/- 4,4	9136 +/- 287
R35TM15	1789 +/- 185	5,09 +/- 0,89	171,74 +/- 17	7290 +/- 658
R50	2315 +/- 459	3,25 +/- 0,76	222,27 +/- 44	14762 +/- 1829

Fonte: Autor, 2025.

Para cálculo do módulo de ruptura (MOR) e elasticidade (MOE), foram utilizados os resultados de força máxima para ruptura da amostra ($F_{\text{máx}}$) e o deslocamento (δ), também apresentados na Tabela 7. Os resultados obtidos indicam que as formulações com maior proporção de tanino em relação à resina fenólica apresentaram desempenho superior em termos de propriedades mecânicas, destacando-se, em particular, as amostras R25TN25 e R25TM25. Esse comportamento está relacionado às características químicas do tanino, cujos grupos fenólicos altamente reativos favorecem a formação de redes poliméricas mais densas e coesas, aumentando a resistência à ruptura (MOR) e a rigidez do material (MOE) (Liu, *et al.*, 2022).

Em comparativo, das amostras com o padrão R50, composto exclusivamente por resina fenólica, observa-se que, embora não haja diferença significativa na resistência média à flexão (MOR), a amostra R25TN25 apresentou os maiores valores tanto de MOR quanto de MOE entre todas as formulações testadas. Isso sugere que existe uma proporção ideal de tanino e resina fenólica que não apenas maximiza a resistência ao rompimento, mas também melhora a capacidade do material de resistir à deformação elástica, refletida no aumento do módulo de elasticidade (MOE). Isso pois, verificando os resultados com as demais amostras, que diferentes teores de tanino, a amostra R25TN25 apresentou maior resistência e estabilidade nos resultados.

Com isso, ao comparar os resultados obtidos neste trabalho com os apresentados por Nath, *et al.*, (2017), observa-se uma concordância em relação ao comportamento mecânico das formulações adesivas contendo tanino. No estudo de Nath, *et al.*, os painéis de partículas produzidos com adesivos à base de tanino extraído da casca de *Ceriops decandra* apresentaram seus maiores valores de módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) nas formulações com 100% de tanino, atingindo aproximadamente 948 MPa (MOE) e 18,4 MPa (MOR). Esse desempenho superior foi associado à maior massa específica e à formação de redes poliméricas mais robustas, apesar das alterações no pH e no aumento da viscosidade do adesivo. Além disso, tanto neste estudo quanto no trabalho de Nath, *et al.*, (2017), verificou-se que misturas intermediárias (como aquelas contendo 50–75% de tanino) apresentaram desempenhos inferiores, possivelmente devido a efeitos negativos na cura do adesivo causados pelas interações químicas entre os componentes.

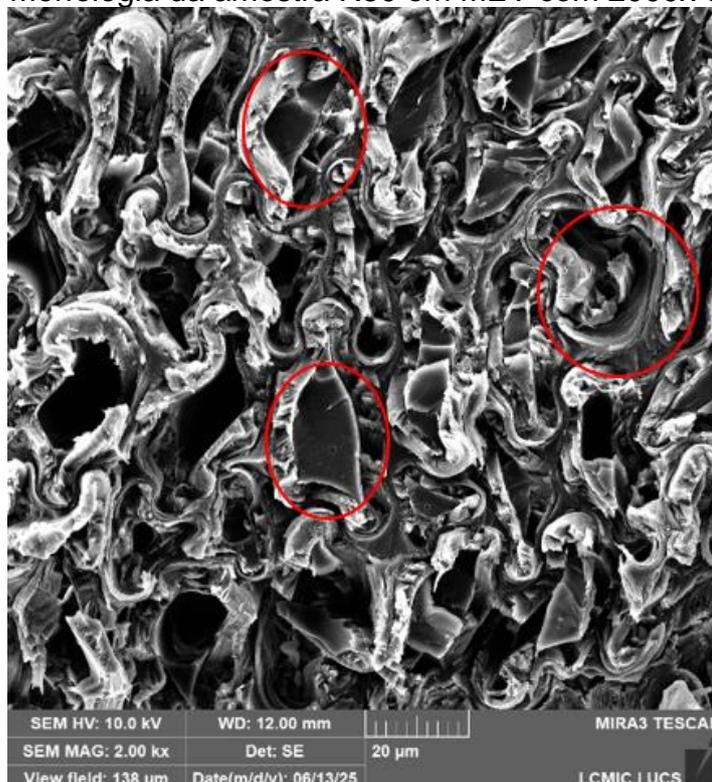
Esses resultados sugerem que a presença de tanino contribui positivamente para o aumento da resistência à ruptura e da rigidez do material, mesmo quando utilizado em substituição parcial às resinas sintéticas, porém reforça a importância de se identificar uma proporção ideal entre tanino e resinas sintéticas para maximizar as propriedades mecânicas do produto final.

4.4. ANÁLISE MORFOLÓGICA DOS PAINÉIS

O objetivo da análise morfológica foi observar a distribuição e o comportamento das diferentes formulações de adesivo (resina fenólica e tanino) no interior da estrutura celular da madeira de pinus, relacionando os aspectos microestruturais com os resultados físicos e mecânicos obtidos nos ensaios laboratoriais.

A amostra R50 (50% resina fenólica), utilizada como padrão de referência, apresentou morfologia visualmente homogênea e adesão entre as camadas, conforme pode ser observado na Figura 11, em vermelho estão circulados os poros da madeira preenchidos pela resina.

Figura 11 - Morfologia da amostra R50 em MEV com 2000x de ampliação.

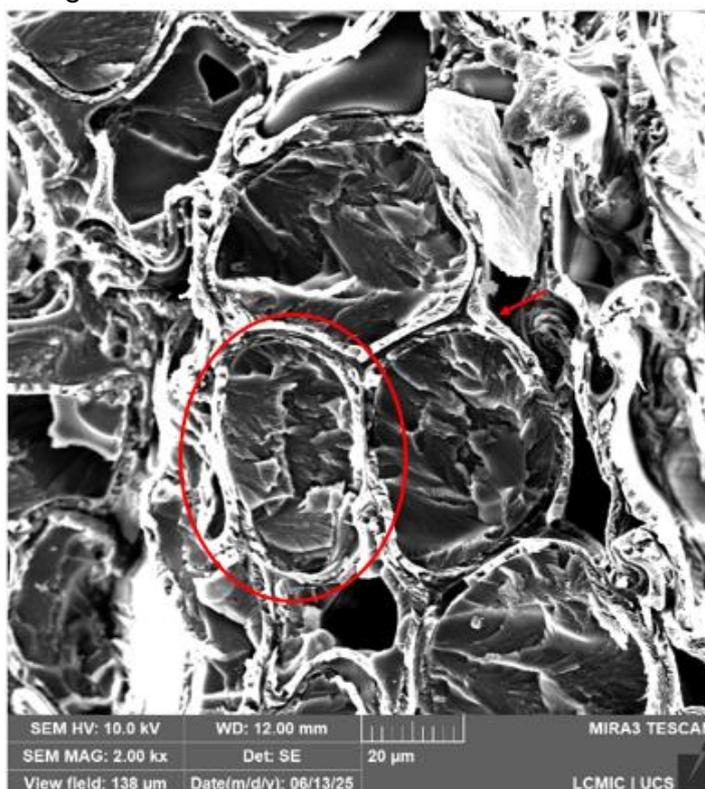


Fonte: Autor, 2025.

A morfologia está de acordo com o bom desempenho físico (menor inchamento entre todas as amostras: 1,89%) e performance mecânica (MOR = 222,27 MPa; MOE = 14.762 MPa), indo ao encontro à literatura, a qual aponta que a resina fenólica resol, tradicionalmente empregada na fabricação de painéis, possui alta reatividade, formação de redes tridimensionais rígidas e com resistência à água (Delgado, *et al.*, 2024; Gonçalves, *et al.*, 2021).

A amostra R25TN25 (25% resina fenólica + 25% tanino natural) apresentou uma microestrutura com elevada continuidade entre fibras e boa dispersão da resina, conforme pode ser observado na Figura 12, em vermelho estão circulados os poros da madeira preenchidos pela resina e por uma seta está indicado a continuidade das fibras.

Figura 12 - Morfologia da amostra R25TN25 em MEV com 2000x de ampliação.



Fonte: Autor, 2025.

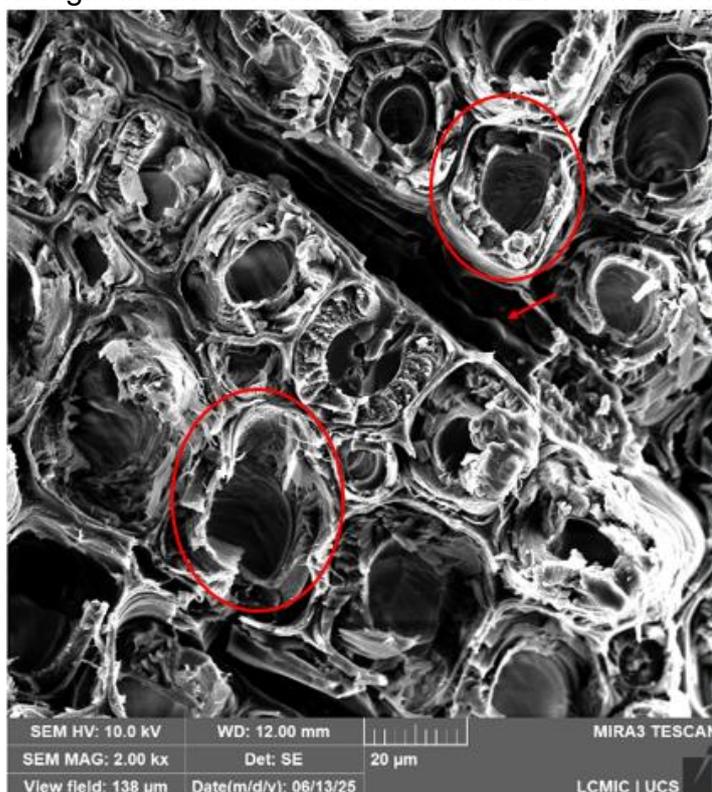
A distribuição do adesivo entre as camadas favoreceu a formação de uma matriz adesiva contínua, visivelmente associada a um desempenho superior em todas as propriedades mecânicas, especialmente no Módulo de Elasticidade (MOE = 16.197 MPa) o qual foi o maior valor registrado.

Os resultados obtidos estão de acordo com Liu, *et al.*, (2022) e Nath, *et al.*, (2018), que demonstraram que taninos naturais, por possuírem grupos fenólicos

livres altamente reativos, promovem reação cruzada mais eficiente com formaldeído ou resinas fenólicas, gerando estruturas tridimensionais mais rígidas. Essa maior massa específica de ligações covalentes justifica o aumento da rigidez observada no ensaio de flexão. A retenção eficiente da resina no interior das fibras também contribuiu para o bom desempenho físico do painel.

A micrografia da amostra R35TN15 (35% de resina fenólica + 15% tanino natural) apresentou estrutura menos coesa, com presença de zonas de descontinuidade e vazios entre as lâminas. Isto pode ser observado na Figura 13, em vermelho estão destacados os poros da madeira vazios e por uma seta está indicado as zonas de descontinuidade.

Figura 13 - Morfologia da amostra R35TN15 em MEV com 2000x de ampliação.



Fonte: Autor, 2025.

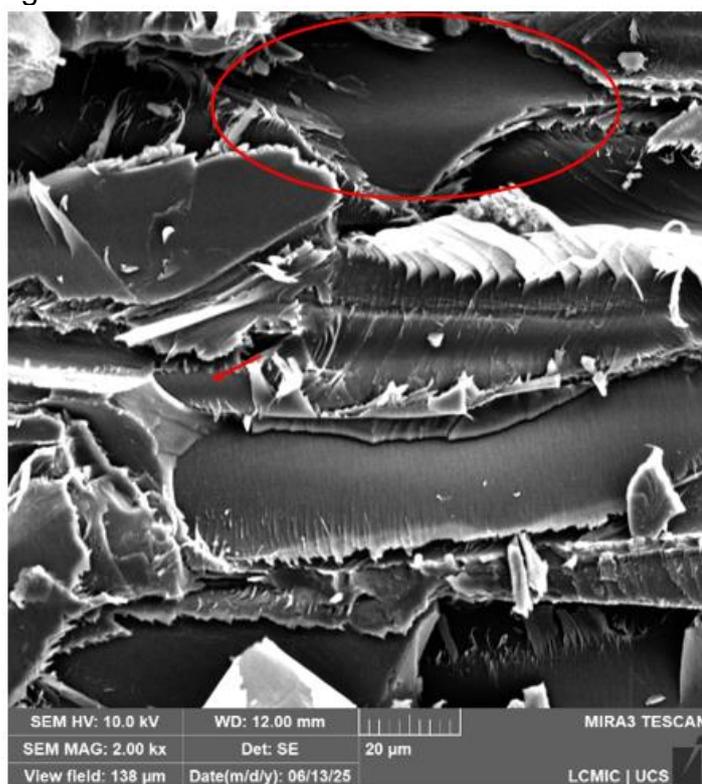
Embora nos ensaios anteriores tenha sido identificado a massa específica dentro da média ($1,15 \text{ g/cm}^3$), essas características morfológicas estão diretamente relacionadas ao menor desempenho mecânico da amostra ($\text{MOE} = 10.129 \text{ MPa}$).

Esses defeitos podem estar relacionados à menor compatibilidade química entre os componentes quando a proporção de tanino é muito reduzida, limitando sua capacidade de interação eficiente com a madeira. Segundo Oktay, *et al.*, (2024),

existe uma proporção ideal entre tanino e resina para que se atinja uma rede tridimensional estável, desbalanceamentos podem comprometer tanto a adesão quanto a integridade física do painel.

A micrografia da amostra R25TM25 (25% resina fenólica + 25% de tanino modificado) revelou uma superfície densa, com preenchimento uniforme dos lúmens celulares e adesão contínua entre as fibras. Isto pode ser observado na Figura 14, em vermelho está circulado os poros da madeira preenchidos pela resina e por uma seta está indicado as áreas de adesão das fibras.

Figura 14 - Morfologia da amostra R25TM25 em MEV/EDS com 2000x de ampliação.



Fonte: Autor, 2025.

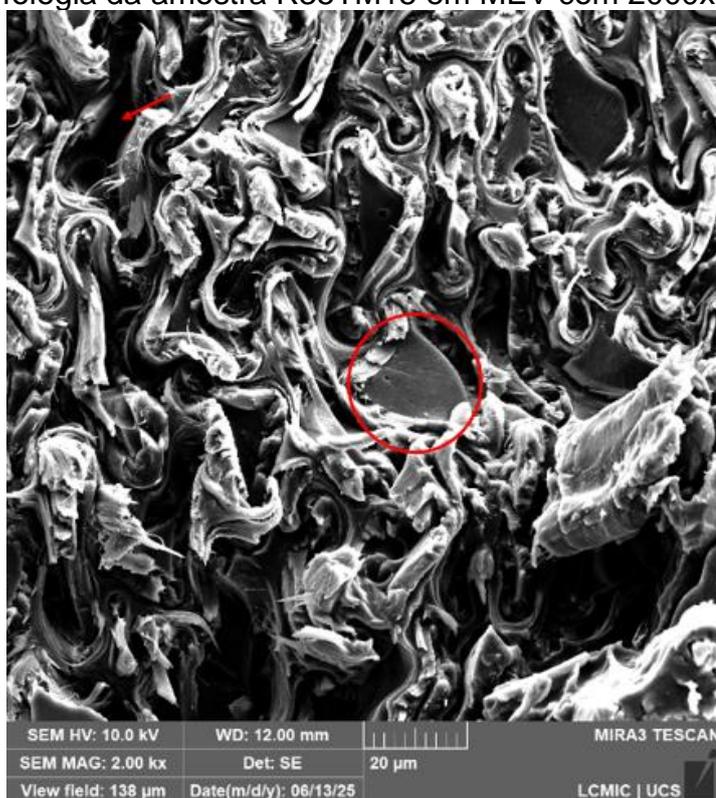
A ausência de microfissuras, delaminações ou zonas escuras indicativas de falhas de colagem reforça a eficiência da penetração da solução na estrutura da madeira, mesmo com a presença de tanino modificado.

Essa morfologia coesa corrobora com os resultados físico-mecânicos obtidos: massa específica elevada ($1,38 \text{ g/cm}^3$), baixa absorção de água (2,21%) e bom desempenho mecânico ($\text{MOR} = 206,5 \text{ MPa}$; $\text{MOE} = 9136 \text{ MPa}$). De acordo com Hafiz, *et al.*, (2020), taninos modificados podem atuar como plastificantes da matriz adesiva, aumentando a fluidez da solução e favorecendo a penetração nos poros da

madeira. Ainda, o bloqueio parcial das hidroxilas nos taninos modificados reduz a formação de ligações de hidrogênio entre as cadeias do polímero, o que tende a aumentar a compatibilidade com a matriz fenólica e melhorar a reticulação.

A morfologia observada na micrografia da amostra R35TM15 (35% resina fenólica + 15% tanino modificado) mostrou estrutura relativamente contínua, mas com presença de porosidade pontual e pequenas falhas de adesão. Isto pode ser observado na Figura 15, em vermelho está circulado os poros da madeira preenchidos pela resina e por uma seta está indicado as áreas de porosidade.

Figura 15 - Morfologia da amostra R35TM15 em MEV com 2000x de ampliação.



Fonte: Autor, 2025.

As regiões escuras entre algumas fibras podem ser indicativas de distribuição não homogênea da resina ou de regiões em que a impregnação foi menos eficiente.

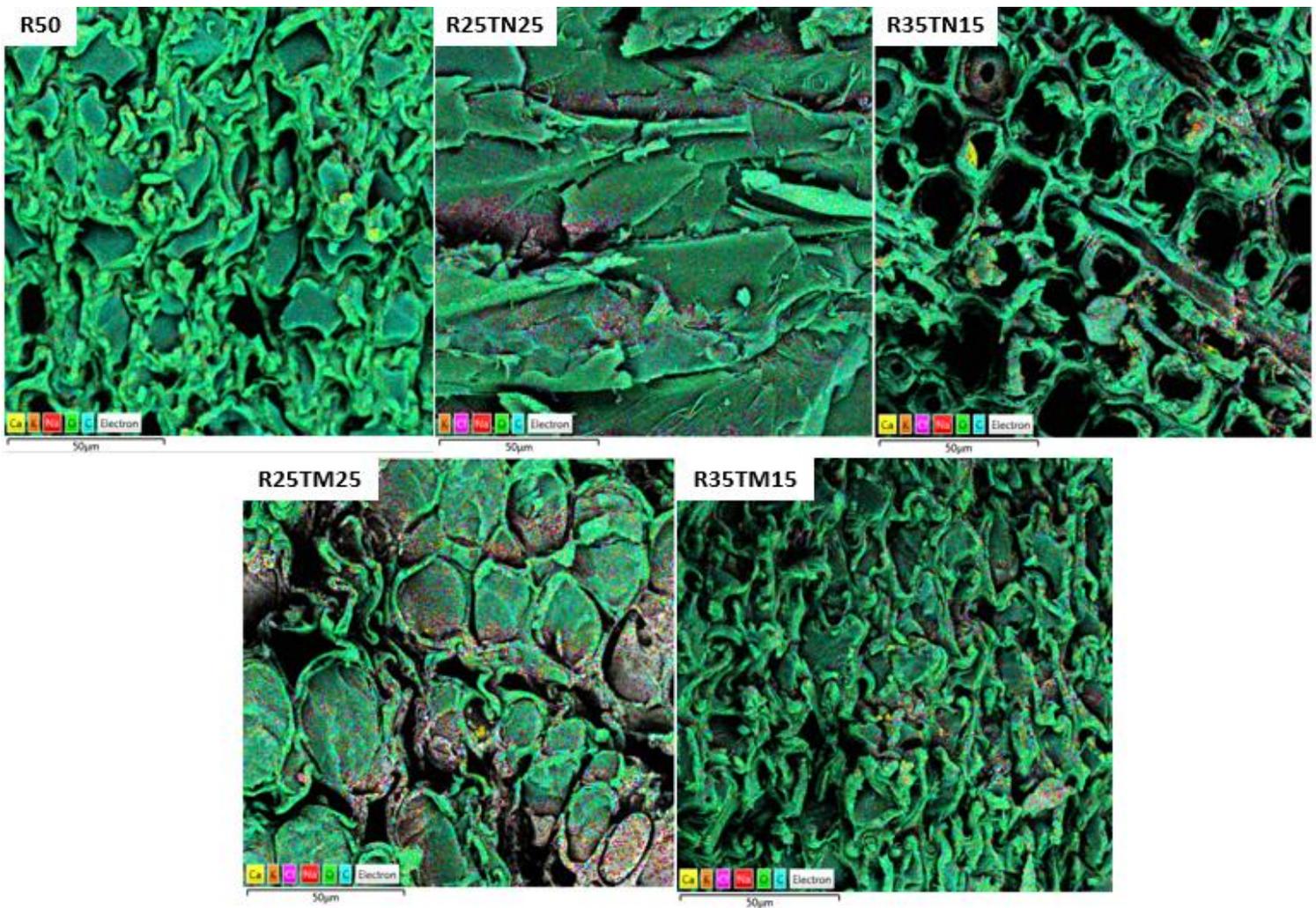
Apesar de ter apresentado bons resultados físicos (baixa absorção de água de 1,84% e inchamento de 2,86%), o desempenho mecânico foi inferior (MOR = 171,74 MPa), sugerindo que o tanino modificado, em baixa proporção, não contribuiu de forma significativa para a formação de uma matriz estrutural densa. Conforme Hemmilä, *et al.*, (2017), quando mal balanceado, o uso de taninos

modificados pode reduzir a massa específica de ligações na matriz adesiva, resultando em menor coesão mecânica, mesmo em estruturas visualmente contínuas.

4.4.1. Análise por EDS (Espectroscopia de Dispersão de Energia)

A espectroscopia de dispersão de energia (EDS), acoplada à microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi empregada para identificar qualitativamente os elementos presentes na superfície dos painéis produzidos com diferentes formulações de tanino e resina fenólica. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 16.

Figura 16 - Mapeamento elemental por EDS das amostras



Fonte: Autor, 2025

Os espectros obtidos mostraram predominância dos elementos carbono (C) e oxigênio (O), como esperado, dada a constituição química da madeira, dos taninos e da própria resina fenólica, todos compostos por cadeias aromáticas, grupos hidroxila e carbonilas (Shirmohammadli, *et al.*, 2018).

Além de carbono (C) e oxigênio (O), os espectros obtidos por EDS revelaram também a presença de sódio (Na), cálcio (Ca) e cloro (Cl) nas amostras analisadas. A ocorrência de sódio pode estar relacionada a traços residuais provenientes do processo de industrialização dos taninos ou da própria formulação da resina fenólica, onde catalisadores alcalinos como o hidróxido de sódio são comumente utilizados (Fan, *et al.*, 2024). O cálcio, por sua vez, é um elemento naturalmente presente em materiais lignocelulósicos, como a madeira de pinus, sendo comumente absorvido do solo pelas plantas ao longo do crescimento (Darmawan, *et al.*, 2016).

A detecção de cloro, ainda que incomum em extratos de tanino obtidos apenas com água, pode ter origem em resíduos de sais provenientes da industrialização comercial do tanino ou de contaminações durante o preparo das soluções de impregnação. Fatores como impurezas na água utilizada ou contaminação cruzada de equipamentos também podem explicar essa presença (Awoyale, *et al.*, 2021).

4.5. PROPRIEDADES QUÍMICAS DOS PAINÉIS

Através da extração por condensação das amostras, foi analisado a concentração de fenol e formaldeído das soluções extraídas, a médias dos resultados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Determinação da concentração de fenol e formaldeído

Identificação	Fenol (mg/L)	Formaldeído (mg/L)
R25TN25	2,11 +/- 0,3	0,58 +/- 0,4
R35TN15	2,65 +/- 0,3	0,76 +/- 0,1
R25TM25	1,67 +/- 0,4	0,33 +/- 0,03
R35TM15	2,28 +/- 0,5	0,26 +/- 0,04
R50	3,90 +/- 0,1	3,13 +/- 0,6

Fonte: Autor, 2025.

Os resultados obtidos mostraram de forma clara que as amostras com menor percentual de resina fenólica, como R25TN25 e R25TM25, apresentaram concentrações mais baixas de fenol e formaldeído em comparação com o padrão R50, que é composto apenas por resina fenólica. A formulação R50 chegou a valores de até 3,9 mg/L de fenol e 3,13 mg/L de formaldeído, enquanto as amostras com tanino, tanto natural quanto modificado, apresentaram concentrações menores. Isso demonstra que a substituição parcial da resina sintética por taninos impacta positivamente o perfil químico do adesivo e, conseqüentemente, dos painéis produzidos, contribuindo para uma menor liberação desses compostos.

Essa redução é importante não só do ponto de vista técnico, mas também do ambiental e regulatório, já que as normas sobre emissão de formaldeído em produtos derivados de madeira estão cada vez mais rígidas. Além disso, outros estudos reforçam essa tendência. Souza, *et al.*, (2020), por exemplo, relataram uma redução de cerca de 22,5% na emissão de formaldeído em painéis aglomerados que continham 10% de extrato tânico, confirmando que a substituição parcial é uma estratégia viável.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho evidenciam o potencial do tanino como alternativa parcial à resina fenólica sintética na produção de painéis de madeira do tipo LVL. A análise das diferentes formulações demonstrou que o uso exclusivo de tanino, seja natural ou modificado, compromete significativamente a integridade estrutural dos painéis. Foram observadas falhas como delaminação, elevada absorção de água e lixiviação do adesivo, indicando que, nessas condições, o tanino isolado não proporciona uma rede polimérica suficientemente estruturada para garantir estabilidade física e resistência mecânica.

Por outro lado, as formulações que combinaram tanino e resina fenólica apresentaram desempenho físico e mecânico superior. Dentre elas, as amostras com 25% de resina fenólica e 25% de tanino, natural ou modificado, foram as que mais se destacaram, apresentando não apenas os maiores valores de resistência à flexão (MOR) e rigidez (MOE), mas também estabilidade frente à absorção de umidade. A qualidade da adesão foi confirmada por meio da análise por microscopia eletrônica de varredura, que revelou uma linha de cola bem definida, com penetração eficiente nas fibras da madeira. Esses resultados indicam uma boa integração química entre o tanino natural e a resina fenólica, possibilitando a formação de uma matriz adesiva com propriedades mecânicas e resistência à umidade, sem comprometer a integridade dimensional do painel.

Além do desempenho técnico, a substituição parcial da resina sintética por tanino natural representa uma estratégia promissora do ponto de vista ambiental. Essa abordagem contribui para a redução do uso de insumos petroquímicos e da emissão de formaldeído, um composto volátil associado a riscos à saúde e ao meio ambiente. A incorporação de materiais renováveis, como o tanino, está alinhada às diretrizes de sustentabilidade e à busca por soluções mais seguras e ecologicamente responsáveis para a indústria de painéis de madeira.

Dessa forma, conclui-se que a substituição parcial da resina fenólica por tanino natural, especialmente na proporção de 25%, é viável, eficiente e sustentável. A formulação proposta equilibra desempenho técnico, estabilidade física e adesiva, e avanços ambientais, reforçando o potencial do tanino como insumo alternativo para a fabricação de compósitos de madeira.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Futuras pesquisas podem avaliar a substituição total da resina fenólica por taninos modificados, visando reduzir o uso de materiais de origem fóssil e minimizar os impactos ambientais do processo produtivo. Para esta modificação podem ser exploradas diferentes modificações químicas nos taninos, como sulfonação, metilação ou oxidação controlada, com o intuito de melhorar a reatividade, a solubilidade e o desempenho adesivo. Também é relevante testar taninos de diferentes fontes vegetais, como acácia, castanheira e quebracho, buscando aprimorar as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos painéis.

REFERÊNCIAS

ABREU, L.B; MENDES, L.M; SILVA,J.R.M. **Aproveitamento de resíduos de painéis de madeira gerados pela indústria moveleira na produção de pequenos objetos**. R. Árvore, Viçosa-MG, v.33, n.1, p.171-177, 2009

Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Formol: pesquisa revela uso irregular**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/noticias-anvisa/2019/formol-pesquisa-revela-uso-irregular>

Acessado em: 20/10/2024.

Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI). **Estudo setorial 2022: ano base 2021**. Curitiba, 2022.

ALMEIDA, M. F. L.; MELO, M. A. C. **Sociotechnical regi-mes, technological innovation and corporate sustaina-bility: from principles to action**. Technology Analysis & Strategic Management, v. 29, n. 4, p. 395-413, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method**. Annual book of ASTM Standarts, ASTM 1298-12b. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **Standart methods of evaluation of the properties of wood - base fiber and particle panel materials**. Annual book of ASTM Standarts, ASTM D1037. 2020.

ARIAS, A; **GARCIA, S.G; RODRÍGUEZ, A.G; EIJOO, G; MOREIRA, M.T. Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of bio-adhesives for the wood panel industry. A comparison with petrochemical alternatives**. Science of The Total Environment, v. 738, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14810:2006 - Painéis de madeira – Determinação da densidade**. Rio de Janeiro, 2006.

AUGUSTINA, S., WAHYUDI, I., DARMAWAN, W., MALIK, J., OKANO, N., OKADA, T., MURAYAMA, K., KOBORI, H., KOJIMA, Y., e SUZUKI, S. **Selected properties of compregnated wood using low molecular weight phenol formaldehyde and succinic anhydride**. Wood Research, v. 66, p. 762-776.

AUGUSTINA, S., DWIANTO, W., WAHYUDI, I., SYAFII, W., GÉRARDIN, P., e MARBUN, SD. **Wood impregnation in relation to its mechanisms and properties enhancement**. *BioResources*, v.18, n.2, p.4332-4372, 2023.

AWUYALE, A.A, LOKHAT, D., OKETE, P. **Investigation of the effects of pretreatment on the elemental composition of ash derived from selected Nigerian lignocellulosic biomass.** Sci Rep, v.11, n.21313, 2021.

CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 120:1992. **Wood-based panels – Determination of formaldehyde content – Extraction method called the perforator method.** Bruxelas, 1992.

CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 13986:2004. **Wood-based panels for use in construction – Characteristics required for use in construction.** Bruxelas, 2004.

CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 622-5:2009. **Fibreboard – Part 5: Determination of thickness swelling and water absorption.** Bruxelas, 2009.

COPANT - COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. Norma COPANT 555. **Método de ensaio de flexão estática para madeiras.** COPANT, 1973.

DARMAWAN, S.; WISTARA, N. J.; PARI, G.; MADDU, A.; SYAFII, W. **Characterization of lignocellulosic biomass as raw material for the production of porous carbon-based materials.** BioRes. v.11, n.2, p.3561-3574, 2016.

DELGADO, J.J.S; GÔMEZ, E.A.Q; CUZME, A.F.Z; MOLINA, B.G.B. **Desarrollo de una Estrategia de producción de resina fenólica alineada con las necesidades del mercado en Ecuador.** Revista Científica y Tecnológica UPSE, v.11, n.1, p.27-41, 2024.

EISFELD, C.de L.; BERGER, R. **Análise das estruturas de mercado das indústrias de painéis de madeira (compensado, mdf e osb) no estado do paraná.** FLORESTA, Curitiba, PR, v. 42, n. 1, p. 21 - 34, jan./mar. 2012.

Embrapa. **Cultivo de Pinus.** Sistema de produção embrapa, 2ª edição, 2021.

FAN, J.; LU, Y.; AN, N.; ZHU, W.; LI, M.; GAO, M.; WANG, X.; WU, C.; WANG, Y. **Pretreatment technologies for lignocellulosic biomass: Research progress, mechanisms, and prospects.** BioResources, v.20, n.2, p.4897-4924, 2024.

FERRERA, T.S.; HELDWEIN, A.B.; DOS SANTOS, C.O.; SOMAVILLA, J.C.; SAUTTER, C.K. **Substâncias fenólicas, flavonoides e capacidade antioxidante em erveiras sob diferentes coberturas do solo e sombreamentos.** Revista Brasileira Plantas Mediciniais, v.18, n.2, p.588-596, 2016.

FILGUEIRA, D., MOLDES, D., FUENTEALBA, C., GARCIA, D.E. **Condensed tannins from pine bark: a novel wood surface modifier assisted by laccase**. *Ind. Crops. Prod.*, v.103, p. 185-194, 2017.

FREIRE, A. L. F; FIGUEIRÊDO, M. C. B; ROSA, M. F.; ARAÚJO JÚNIOR, C. P. **Impactos ambientais de painéis de madeira e derivados - Uma revisão de literatura**. *Revista Espacios*, v. 36, p. 3, 2015.

Food and agriculture organization of the United Nations (FAOSTAT). **Classification of forest products 2022**. Roma, 2022.

FRANZONI, J.A; RIGATTO, P.A; BETTEGA, W.P. **Avaliação da qualidade do compensado fenólico de eucalyptus grandis**. *Ciência Florestal*, v. 16, n. 4, p. 437-443, 2006.

GHAHRI, S. PIZZI, A. **Improving soy-based adhesives for wood particleboard by tannins addition**. *Wood Sci. Technol.* v.52, n.1, p. 261-279, 2018.

GONÇALVES, F., LELIS, R., CARVALHO, L., SOUZA, N., TEODORO, Â. **Emissão de Formaldeído e de Compostos Orgânicos Voláteis nas Indústrias**. Em *Engenharia madeireira: pesquisa e produção*. p. 76–100. Rio de Janeiro, 2017.

GONÇALVES, D; BORDADO, J.M; MARQUES, A.C; SANTOS, R.G. **Non-Formaldehyde, Bio-Based Adhesives for Use in Wood-Based Panel Manufacturing Industry—A Review**. *Polymers*. v. 13, p.4086, 2021.

HAFIZ, N.L.M; TAHIR, P.M; HUA, L.S; ABIDIN, Z.Z; SABARUDDIN, F.A; YUNUS, N.M; ABDULLAH, U.H; KHALIL, A. **Curing and thermal properties of copolymerized tannin phenol–formaldehyde resin for bonding wood veneers**. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 4, p.6994-700, 2020.

HEMMILÃ, V; ADAMOPOULOS, S; KARLSSON, O; KUMAR, A. **Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels – A Review**. *Revista Royal Society of Chemistry*, v.7, p. 38604–38630, 2017.

IARC - **Agência Internacional de Pesquisa em Câncer**, 2016.

Industria Brasileira de árvores (IBÁ). **Relatório Anual 2024, ano base 2023**. Brasília, 2024.

Industria Brasileira de árvores (IBÁ). **Relatório Anual 2022, ano base 2021**. Brasília, 2024.

Instituto Nacional de Câncer (INCA). **Formaldeído, câncer e os riscos para a saúde**. Rio de Janeiro, RJ. 2024.

LI, K.; ZHANG, W.; CHEN, L. et al. Advances in Tannin-Based Adhesives for Wood Composites: A Review. *Polymers*, 13(14): 2319, 2021

LIU, B; ZHOU, Y; ESSAWY, H; CHEN, Q; LIANG, J; ZHOU, X; DU, G. **Formaldehyde free tannin-based adhesive with epoxy as hardener for plywood**. *Maderas, Ciencia y tecnología*, v. 24, p. 43–54, 2022.

MAYARD, R; ALCÂNTARA, P.G; SANTOS, L.L; GONÇALVES, F.G; SILVA, J.G. **Influência dos anéis de crescimento nas propriedades mecânicas da madeira de Pinus**. *Madera y Bosques*. v. 28, n. 3, 2022.

MONTEIRO, J.M; ALBUQUERQUE, U.P; ARAÚJO, E.L. **Taninos: uma abordagem da química à ecologia**. *Quim. Nova*, v. 28, n. 5, p. 892-896, 2005.

OLIVEIRA, Y. M. M. de; OLIVEIRA, E. B. de. **Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental**. Cap. 1, p. 11-20. Brasília, DF : Embrapa, 2017.

NATH, S.K., ISLAM, M.N., RAHMAN, K.S., RANA, M.N. **Tannin-based adhesive from *Ceriops decandra* (Griff.) bark for the production of particleboard**. *J. Indian. Acad. Wood Sci*, v.15, n.1, p. 21-27, 2018.

NOCE, R.; CARVALHO, R. M. M. A.; CANTO, J. L.; SILVA, M. L.; MENDES, L. M. **Medida de desigualdade do mercado internacional de compensado**. *Revista Cerne*, v. 13, n. 1, p. 107 - 110, 2007.

OLIVEIRA, Pedro Henrique Ramos. **Fenol (CAS 108-95-2) - Métodos de Preparação Industrial de Solventes e Reagentes Químicos**. *Revista Virtual de Química* ISSN 1984-6835. v.7, n.4, p. 1579-1593, 2015.

OKTAY, S; PIZZI, A; KOKEN, N; BENGU, B. **Tannin-based wood panel adhesives**. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v.130, 2024.

RAMOS, F. et al. **Considerações sobre o desenvolvimento de um sistema construtivo misto concreto e madeira laminada cruzada**. *Conjecturas*, v. 22, n. 8, p. 745 – 759, 2022.

REMADE. *Revista da Madeira: Diversidade de produção amplia usos no setor*. Edição no 95. Abril, 2006.

RINDLER, A., VAY, O., HANSMANN, C. *et al.* **Dimensional stability of multi-layered wood-based panels: a review.** *Wood Sci Technol.* v.51 , p. 969–996, 2017.

RIBASKI, N.G; HILLING, E; MIRANDA, G.M; CATAPAN, D.C. **Análise da produção de compensados do estado do paraná.** *Braz. J. of Develop., Curitiba,* v. 3, n. 1, p. 2-33, jan./jun. 2017.

ROVEDDER P.J; ACOSTA1, A.P; SCHULZ, H.R; GALLIO, E; GATTO, D.A. **Propriedades físicas e químicas da madeira de Pinus elliottii impregnada com sílica.** *Scientia Forestalis,* v. 49, p.13. 2021.

SANTOS, C., VARGAS, A., FRONZA, N., SANTOS, J.H.Z. **Structural, textural and morphological characteristics of tannins from Acacia mearnsii encapsulated using sol-gel methods: applications as antimicrobial agents.** *Colloids Surf. B Biointerfaces,* v.151, p. 26-33, 2017.

SCHEEREN, D; MÜHLMANN, C.M; MÜLLER, F. **Avalia o das propriedades de um compósito de matriz polimérica de polipropileno reciclado reforçado com resíduo de madeira.** *Universidade de Santa Cruz do Sul;* v. 24, n. 2, 2020.

SHIRMOHAMMADLI, Y.; HOSSEINNEZHAD, S.; NAJAFI, S. K. **Tannins as a sustainable raw material for green chemistry: A review.** *Industrial Crops and Products,* v.126, p.316-332, 2018.

SOARES, A. K.; CADEMARTORI, P.H.G.; EVTYUGIN, D.V. **Eficiência do tratamento combinado de impregna o e termorretifica o nas propriedades da madeira de pinus.** *Revista Matéria,* v.23, n.4, 2018.

SOUZA, J.B; AZEVÊDO, T.K.B; SOUSA, T.B; SILVA, G.G.C; GUIMARÃES, J.B; PIMENTA; A.S. **Plywood bonding with an adhesive based on tannins from Acacia mangium Wild. bark from trees grown in Northeastern Brazil.** *Rev. Bras. Cienc. Agrar., Recife,* v.15, n.4, 2020.

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

VIEIRA, M.C; BRITO, E.O; GONÇALVES, F.G. **Evolu o Econ mica do Painel Compensado no Brasil e no Mundo.** *Floresta e Ambiente,* v. 19, n. 3, p. 277-285, 2012.

WAKIRI, S; NETO, R.Z; ALMEIDA, B.C; BIASI, C.P; CHIES, D; GUI SANTES, F.P; FRANZONI, J.A; RIGATTO, P.A; BETTEGA, W.P. **Avalia o da qualidade do compensado fenólico de eucalyptus grandis.** *Ciência Florestal,* v. 16, n. 4, p. 437-443, 2006.

ZHANG, W.; FENG, Y.; ZHANG, L. et al. **Application of SEM and EDS in wood adhesive research: A review.** Wood Research, v.64, n.3, p.387-396, 2019.