



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciências e Engenharia – Câmpus de Itapeva

CAMILLA KAWANE DE CARVALHO ARAUJO

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE PAINÉIS DE
MADEIRA COMPENSADA DE PINUS COLADOS COM RESINA FENÓLICA COM
SUBSTITUIÇÃO DE LIGNINA**

Itapeva - SP
2023

CAMILLA KAWANE DE CARVALHO ARAUJO

Determinação das propriedades físico-mecânicas de painéis de madeira compensada de Pinus colados com resina fenólica e substituição de lignina

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Conselho de Curso de Engenharia Industrial - Madeira, da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e Engenharia, Câmpus de Itapeva, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Industrial-madeira.

Orientadora: Prof. Dr. Cristiane Inácio de Campos

Itapeva - SP
2023

A663d Araujo, Camilla Kawane de Carvalho
Determinação das propriedades físico-mecânicas de painéis de madeira compensada de pinus colados com resina fenólica e substituição de lignina / Camilla Kawane de Carvalho Araujo. -- Itapeva, 2023
49 f.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva
Orientadora: Cristiane Inácio de Campos

1. Compensado. 2. Fenol-formaldeído. 3. Lignina. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Instituto de Ciências e Engenharia - Câmpus de Itapeva

CAMILLA KAWANE CECILIANO DE CARVALHO ARAUJO

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE
PAINÉIS DE MADEIRA COMPENSADA DE PINUS COLADOS COM
RESINA FENÓLICA E SUBSTITUIÇÃO DE LIGNINA**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Industrial - Madeira, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof.ª Associada Cristiane Inácio de Campos
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

2º Examinador: Prof.ª Dr.ª Gláucia Aparecida Prates
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

3º Examinador: Prof. Dr. Gustavo Ventorim
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Itapeva, 20/06/2023.

*Ao Deus onipotente pelo fôlego de vida e à
minha família pela compreensão, carinho e
apoio incessável.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, e pela infinita misericórdia em me proporcionar mais esta conquista. Pela força que me concedeu em todos os momentos difíceis, quando o desespero tomava conta Ele me consolava e me ajudava a continuar batalhando pelo meu sonho, sempre mostrando que para o meu Deus nada é impossível independente das situações que me cercassem. Pelo amor, paciência e cuidado em todos os detalhes.

Aos meus amados pais Nilton e Claudinéia, pelo amor, apoio e incentivo desde pequena. Por acreditarem em mim, e por serem a minha base em tudo nesta vida. Agradeço por tudo o que fizeram por mim, muitas das vezes abrindo mão dos próprios sonhos, para que o meu pudesse ser realizado. Pelos abraços carinhosos, pelos conselhos e até pelas broncas, pois sei que tudo sempre foi para o meu bem, e para que hoje tudo isso pudesse se tornar realidade.

Às minhas amadas irmãs, Sâmella, Sâmique e Cristiane, que são minhas maiores inspirações, sempre me incentivando e acreditando em mim, pela paciência, carinho e companheirismo em todos os momentos da minha vida, sabendo que sempre que precisasse teria um ombro amigo para recorrer com palavras doces e repletas de amor.

Aos meus lindos sobrinhos, Helloísa, Bernardo e Izabel, que mesmo tão pequenos, basta estar perto deles que toda preocupação vai embora, com todo o jeitinho meigo e repleto de carinho em cada olhar e sorriso.

Aos meus cunhados, Bruno e Rafael, pela amizade, sempre me alegrando e me incentivando, pela ajuda e carinho demonstrado.

À minha orientadora Dr^a Cristiane Inácio de Campos, pelo tempo disponibilizado a mim, pela dedicação em tirar todas as minhas dúvidas e sempre disposta a me ajudar nas dificuldades que se apresentavam, pela compreensão, ajuda e parceria nesses anos juntas.

A todos os professores, amigos e colegas que de certa forma contribuíram para que este momento se tornasse possível. Aos técnicos Alex e Tiago, pelo auxílio em toda a execução deste trabalho.

“O temor do Senhor é o princípio da ciência: os loucos desprezam a sabedoria e a instrução.”

(BÍBLIA, Provérbios, 1, 7).

RESUMO

Os produtos engenheirados de madeira vêm sendo empregados em diferentes aplicações, desde elementos estruturais para a construção civil até a indústria de móveis e embalagens. Dentre esses produtos, pode-se destacar os painéis laminados, como o compensado que é constituído por lâminas de madeira coladas e defasadas de 90° em relação as adjacentes. Este projeto consiste em produzir, caracterizar e avaliar as propriedades físicas e mecânicas desses painéis de madeira compensada com e sem substituição de lignina em pó associada ao adesivo fenólico. Os painéis foram produzidos com lâminas de pinus e colados com resina fenol-formaldeído comercial com substituição de lignina nas proporções de 10 e 20% em relação a massa de resina. Os ensaios físico-mecânicos foram realizados segundo as normas brasileiras da ABNT NBR para determinação da densidade, teor de umidade, inchamento em espessura, qualidade de colagem e para a determinação do módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) à flexão estática nas direções paralela e perpendicular às fibras das lâminas externas. A partir dos resultados pode-se observar que a substituição de lignina ao adesivo, proporcionou melhor desempenho físico-mecânico ao painel, podendo destacar as propriedades físicas, visto que a análise dos mesmos quando comparados à literatura e documentos normativos, mostraram-se superiores.

Palavras-chave: compensado; fenol-formaldeído; lignina.

ABSTRACT

Engineered wood products have been used in different applications, from structural elements for civil construction to the furniture and packaging industry. Among these products, laminated panels can be highlighted, such as plywood, which is made up of glued wooden veneers 90° out of phase with the adjacent ones. This project consists of producing, characterizing and evaluating the physical and mechanical properties of these plywood panels with and without replacement of powdered lignin associated with the phenolic adhesive. The panels were produced with pine blades and glued with commercial phenol-formaldehyde resin with lignin replacement in proportions of 10 and 20% in relation to resin mass. The physical-mechanical tests were carried out according to the Brazilian standards of ABNT NBR for determination of density, moisture content, swelling in thickness, bonding quality and for determination of modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) to flexion static in the parallel and perpendicular directions to the fibers of the outer laminae. From the results it can be observed that the replacement of lignin to the adhesive, provided better physical-mechanical performance to the panel, being able to highlight the physical properties, since the analysis of the same when compared to the literature and normative documents, proved to be superior.

Keywords: plywood; phenolic adhesive; lignin.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Lâmina em dimensão comercial.....	26
Figura 2: Lignina utilizada.....	27
Figura 3: Fenol cristal.....	27
Figura 4: Mistura de lignina ao adesivo.....	28
Figura 5: Preparo do adesivo.....	29
Figura 6: Classificação visual das lâminas.....	30
Figura 7: Acomodação das lâminas na estufa.....	30
Figura 8: Estufa utilizada na secagem das lâminas.....	31
Figura 9: Aplicação do adesivo na lâmina.....	32
Figura 10: Pré-prensagem dos painéis.....	32
Figura 11: - Prensa hidráulica com capacidade de carga de 80 toneladas.....	33
Figura 12: Corpos de prova seccionados para a realização dos testes físicos e mecânicos.....	33
Figura 13:Corpos de prova utilizados.....	35
Figura 14:Ensaio de flexão realizado na EMIC.....	38
Figura 15: Corpo de prova utilizado no ensaio de cisalhamento.....	39
Figura 16: Realização do ensaio de cisalhamento na linha de cola.....	40
Figura 17:Delaminação do corpo de prova.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados de massa específica e, respectivo desvio padrão.....	41
Tabela 2: Teor de umidade.....	42
Tabela 3: Valores médios para o teste de Inchamento em espessura.....	433
Tabela 4: Flexão estática na direção paralela às fibras.....	444
Tabela 5: Flexão estática na direção perpendicular às fibras.....	44
Tabela 6: Cisalhamento na linha de cola.....	455
Quadro 1: Comparação dos valores obtidos no estudo para os ensaios físicos com a norma	46
Quadro 1: Comparação dos valores obtidos para os ensaios mecânicos com a norma.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
HD	Hardboard
HDF	Painel de fibras de alta densidade
LSL	Laminated strand lumber
LVL	Laminated veneer lumber
MDF	Painel de fibras de média densidade
MF	Melamina-formaldeído
MOE	Módulo de elasticidade
MOR	Módulo de ruptura
MUF	Melamina-ureia-formaldeído
OSB	Oriented strand board
OSL	Oriented strand lumber
UF	Ureia-formaldeído
WB	Waferboard

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1 Objetivos específicos	16
3. REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1 Painéis de Madeira	17
3.2 Painéis Compensados	18
3.3 Interferência da qualidade da madeira na colagem	20
3.5 Adesivos para fabricação de painéis	21
3.6 Emissão de formaldeído	23
3.7 Lignina	24
4. MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 Materiais	26
4.2 Preparo do adesivo Fenol-formaldeído com substituição de lignina	28
4.3 Classificação das lâminas	29
4.4 Produção dos painéis	30
4.5 Ensaio físicos	34
4.5.1 Massa específica.....	34
4.5.2 Teor de Umidade.....	34
4.5.3 Inchamento em espessura	35
4.6 Ensaio mecânicos	37
4.6.1 Flexão estática	37
4.6.2 Cisalhamento da linha de cola	39
4.7 Análise Estatística	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1 Massa específica	41
5.2 Teor de umidade	42
5.3 Inchamento em espessura	42
5.4 Flexão estática	44
5.5 Cisalhamento na linha de cola	45
5.6 Quadro comparativo dos ensaios realizados	45
6. CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro tem grande importância econômica no país, isto porque o Brasil apresenta uma vasta área de florestas nativas e de reflorestamento. Apesar da vasta área de florestas, com o passar do tempo observou-se a necessidade de racionalização da madeira, desenvolvendo novas tecnologias que além de diminuir a geração de resíduos com a melhor utilização dos recursos florestais, também pôde-se melhorar suas propriedades. Neste contexto de uso mais racional da madeira a partir de florestas plantadas e com menor geração de resíduos, pode-se destacar produtos como os painéis à base de madeira.

Os painéis de madeira vêm sendo empregados em diferentes aplicações, desde elementos estruturais para a construção civil até a indústria de móveis e embalagens. Dentre esses produtos, pode-se destacar os painéis laminados, como o compensado que é constituído por lâminas de madeira coladas e defasadas de 90° em relação as adjacentes, caracterizado por suas excelentes propriedades mecânicas como, elevada resistência nas duas direções e boa estabilidade dimensional quando em contato com água.

Na produção de painéis um dos principais elementos é o adesivo utilizado, que além de trazer excelentes características físicas-mecânicas. A escolha do adesivo para a produção de painéis é de suma importância, e os fatores a serem analisados dependerá do uso final das chapas.

Atualmente os principais adesivos utilizados pelas indústrias são os adesivos ureia-formaldeído, fenol-formaldeído, resorcinol-formaldeído e melamina-formaldeído. Contudo esses adesivos são provenientes de recursos não renováveis além de trazerem diversos riscos à saúde por apresentarem índices consideráveis de toxicidade.

Embasado nos riscos ambientais e humanos, muitas pesquisas vêm sendo realizadas buscando novas alternativas que não apresentem alta toxicidade, bem como a presença de formaldeído, uma dessas alternativas é a utilização da lignina. A lignina possui um grande potencial para substituir muitos adesivos utilizados

atualmente. Acredita-se que o adesivo à base de lignina poderá ser muito eficaz se produzidos a baixo custo, com equipamentos convencionais, e ainda exercerem a mesma força de ligação exigida.

A lignina obtida do licor negro Kraft é uma das alternativas a serem utilizadas, visto que busca-se uma utilização mais nobre para a lignina do que apenas a queima para geração de energia, como é usualmente realizado atualmente.

Dado o exposto, a proposta deste estudo foi produzir painéis compensados utilizando o adesivo o fenol-formaldeído com substituição de lignina em duas porcentagens diferentes, e avaliar a influência dessa substituição nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis visando melhores aplicações para os mesmos.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi determinar o efeito da substituição de lignina residual na resina fenólica, para avaliar as propriedades físicas e mecânicas de painéis de madeira compensada produzido com madeira de pinus.

2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Analisar o efeito da substituição de lignina em 10% e 20% da massa de resina fenólica na fabricação de painel;
- Caracterizar fisicamente os painéis de acordo com os documentos normativos nacionais: ABNT NBR 9485 (2011), ABNT NBR 9484 (2011), ABNT NBR 9535 (2011);
- Caracterizar mecanicamente os painéis de acordo com as especificações normativas: ABNT NBR 9533 (2012) e ABNT NBR ISSO 12466-1 (2012);
- Analisar estatisticamente os resultados para cada uma das propriedades que serão realizadas;
- Comparar o desempenho dos painéis sem e com o uso de lignina e, comparar com especificações normativas e literatura.

3. REVISÃO DA LITERATURA

A seguir está apresentada a revisão da literatura que serviu de embasamento teórico para o desenvolvimento do estudo. A revisão foi realizada em bases de dados como a Scopus, Web of Science e Google Scholar.

3.1 Painéis de Madeira

A utilização da madeira serrada em si vem diminuindo gradativamente com o passar do tempo, por outro lado o consumo de painéis de madeira tem se mostrado em um cenário crescente. Essa redução se deve a alguns fatores principais, como a escassez de madeira de diâmetros necessários para a exploração, o grande avanço tecnológico na fabricação de painéis de madeira que os torna mais baratos e mais competitivos, a questão ambiental visto que há uma grande pressão contra a destruição das florestas e por fim o aceite do mercado em utilizar derivados da madeira, como o painel que atenda as mesmas necessidades que a madeira sólida (VIEIRA; BRITO; GONÇALVES, 2012).

Os painéis de madeira são produtos fabricados com a madeira em diferentes formas, como lâminas, sarrafos, partículas e fibras que quando expostos à pressão e temperatura nos mais variados estágios e com o uso de adesivos são agregados e formam um novo produto alternativo à madeira maciça (MATTOS; GONÇALVES; LACERDA, 2008)

Segundo Youngquist (1999) os painéis de madeira podem ser divididos em três grupos principais, sendo eles:

- Painéis de Lâminas como por exemplo a chapa de madeira compensada (plywood), chapa de madeira sarrafeada, e LVL (laminated veneer lumber);
- Painéis de Partículas como as chapas de madeira aglomerada (particleboard), chapas de lascas de madeira não orientadas (WB - waferboard), chapas de lascas orientadas (OSB – oriented strand board), (OSL oriented strand lumber) e (LSL – laminated strand lumber);
- Painéis de Fibras como as chapas de fibra isolante, chapa dura de fibra e chapa de alta densidade (HD - hardboard) e chapas de fibras de média densidade (MDF).

A área de painéis de madeira tem se apresentado como um setor altamente dinâmico, principalmente no Brasil. Com o avanço tecnológico o painel de madeira está passando por diversas modificações em seu melhoramento, para posteriormente ter uma melhor aplicação nas áreas de fabricação de móveis, pisos, na construção civil e também como substituto aos materiais de proveniência não renovável, como por exemplo os petroquímicos (MARCHESAN *et al.*, 2022).

O setor florestal no Brasil, possui uma grande e importante contribuição na economia brasileira, gerando impostos e também fornecendo produtos que podem ser destinados para o consumo direto e também podem ser destinados à exportação, sendo assim há criação de empregos para a população e ainda auxilia na conservação e preservação dos recursos naturais (RIBASKI, 2018).

De acordo com Silva *et al.* (2019) no período de 1961 a 2016 (55 anos), o Brasil produziu cerca de 213 milhões m³ de painéis de madeira, sendo 38% Compensado, 23% de Partículas, 19% de MDF e HDF, 10% de chapas duras de fibras, 6% de OSB+Partículas, 1% de OSB e 1% de outros. Ao longo desse período observou-se que houve um grande crescimento da produção de painéis com ênfase em MDF+HDF, contudo historicamente o painel Compensado é o tipo de painel mais produzido no Brasil e também é o principal produto de exportação. O consumo per capita de painéis nesses 55 anos cresceu em quase dez vezes mais, ou seja, os painéis de madeira desempenham importante papel na indústria de base florestal.

3.2 Painéis Compensados

O painel de madeira compensada é um exemplo de painel fabricado que possui excelente aplicação no uso estrutural. De acordo com Iwakiri, Albuquerque e Keinert Junior (2005), o painel compensado é definido como produto produzido através de lâminas coladas em número ímpar de camadas, com direção da grã (disposição geral dos elementos axiais da madeira) perpendicular entre as camadas adjacentes.

Irle *et al.* (2012) afirma que o compensado quando comparado a madeira serrada, apresenta propriedades mecânicas mais isotrópicas, e a resistência à ruptura é maior especialmente quando avaliado seu desempenho no sentido perpendicular as fibras da madeira. Afirma ainda que as suas propriedades dependem do adesivo, gramatura de adesivo e qualidade das lâminas de madeira utilizadas.

De acordo com Borboletto Júnior e Garcia (2004) as propriedades mecânicas do compensado apresentam excelentes resultados devido ao direcionamento ortogonal de uma lâmina em relação a outra, onde este formato restringe a movimentação tangencial das camadas, proporcionando ao painel uma melhor estabilidade dimensional. O direcionamento cruzado também traz ao painel a uniformidade das suas propriedades mecânicas nas duas direções do plano da chapa. Boborletto Júnior e Garcia (2004) tiveram como resultados de resistência (MOR) e rigidez (MOE) à flexão estática no sentido paralelo às fibras de 34MPa para MOR e 4474 MPa para MOE, no sentido perpendicular às fibras 32 MPa para MOR e 3606MPa para MOE.

Para o ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola Júnior *et al.* (2009) encontrou em seu estudo um valor médio de 1,46 MPa, e falhas na madeira em 52,11%.

O compensado possui uma característica muito importante no quesito de uso estrutural, ele é capaz de suportar cargas de impacto e também alta resistência a formação de rachaduras (WALKER, 2006). Ainda de acordo com Tsoumis *et al.* (1991) essa resistência a rachaduras é muito importante no quesito a uso de pregos e outros conectores.

No Brasil, a fabricação do compensado é encontrada de duas maneiras diferentes, sendo elas em painéis multilaminados conhecidos como plywood, ou sarrafeados conhecidos como blockboard, em ambas as situações a característica que se destaca é a alta resistência mecânica (MENDOZA, 2010).

Os painéis multilaminados (plywood), são compostos por lâminas de madeira sobrepostas uma à outra em número ímpar de camadas sempre em direção cruzada. Esses painéis são destinados para uso interior e exterior dependendo do adesivo utilizado. Já os painéis do tipo compensado sarrafeado

(blockboard), são confeccionados de maneira que o miolo do painel é composto por sarrafos e as extremidades com lâminas, geralmente é fabricado com 5 lâminas. Este painel possui ainda uma maior resistência que os multilaminados, e são muito utilizados na fabricação de móveis (IWAKIRI, 2003).

Devido às suas excelentes características estruturais, o compensado tem grande aplicabilidade em sistemas construtivos, como o Wood Frame, sendo utilizado como pisos, paredes e até mesmo como fechamento de teto. No Brasil devido ao seu clima tropical, ainda há uma defasagem da fabricação desses painéis para uso na construção civil, sendo necessária uma atenção para tratamentos preservativos e de estabilização de suas propriedades, para que possa se evitar ataques de agentes xilófagos e também à ação da umidade e temperatura (FERREIRA; SILVA; CAMPOS, 2017).

3.3 Interferência da qualidade da madeira na colagem

O painel compensado tem múltiplas aplicações, sua produção, uso final e qualidade depende de diversos fatores como espécie, características do fuste, densidade, porosidade, alburno e cerne, lenho inicial e tardio, grã, madeira juvenil, madeira de reação, extrativos, ph e teor de umidade (TSOUMIS *et al.*, 1991).

Para Baldwin (1981) a espécie de madeira a ser utilizada na produção do compensado interfere nas propriedades de colagem, estabilidade dimensional e resistência mecânica.

O processo de laminação das toras para a produção de compensado é dividido em algumas fases, sendo elas: preparação das toras com o descascamento, seccionamento, aquecimento, laminação, seguem então para o transporte, guilhotinagem e secagem, por isso a escolha da espécie de madeira é importante para esta possa atender as necessidades de todo o processo (IWAKIRI; ALBUQUERQUE; KEINERT JUNIOR, 2005).

O diâmetro e a forma do fuste são muito importantes na escolha de uma espécie adequada para a laminação, a qualidade da tora quanto à retidão, fator de conicidade, ausência de fendas influenciam no processo de laminação das toras bem como na qualidade das lâminas (BALDWIN, 1981).

De acordo com Marra (1992), as características anatômicas da madeira possuem influência direta na variabilidade da densidade e porosidade que ocorrem na transição do lenho inicial e tardio. Essas diferenças são as causadoras de dificuldades na formulação de adesivos, pois influenciam a penetração do adesivo líquido na estrutura da madeira e conseqüentemente na ligação adesiva entre as duas faces das lâminas. Ainda interferindo na colagem, tem-se a proporção de cerne e alburno, sendo que o cerne é menos permeável se comparado ao alburno, dificultando a secagem e absorção de líquidos.

O alto teor de extrativos, em algumas espécies de madeira, podem influenciar negativamente na colagem das lâminas, isso ocorre no processo de secagem das lâminas onde há a migração dos extrativos para a superfície das lâminas, podendo então prejudicar a penetração dos adesivos, conseqüentemente impedindo a ligação de uma lâmina à outra (SELLERS, 1985).

Outra preocupação é em relação ao pH da madeira, que podem prejudicar na cura do adesivo, como por exemplo a acidez extrema pode reduzir a resistência da junta de colagem e ainda afetar os compostos celulósicos a madeira (MARRA, 1992).

O teor de umidade da madeira também exerce grande influência sobre o processo de colagem, tempo de secagem e prensagem das lâminas dos compensados. No processo de produção o teor de umidade das lâminas é realizado em função do adesivo a ser utilizado na colagem (IWAKIRI; ALBUQUERQUE; KEINERT JUNIOR, 2005).

Dado o exposto é de suma importância realizar uma escolha adequada da madeira a ser utilizada bem como atentar-se com a qualidade da mesma. Uma das madeiras muito utilizadas em estudos, dadas as suas propriedades é a madeira de Pinus.

3.5 Adesivos para fabricação de painéis

Os adesivos são uma substância que possui propriedades aderentes capazes de unir outros materiais em sua superfície, estes podem ser naturais ou sintéticos. Os adesivos sintéticos possuem características semelhantes aos naturais, porém são fabricados pelo homem. Essa adaptação faz com que os

adesivos possuam características favoráveis para cada tipo de uso, bem como mais resistência à água (CÉSAR, 2011).

Os adesivos são utilizados em vários processos de beneficiamento da madeira, como por exemplo na produção de painéis aglomerados, compensados, chapas de partículas, entre outros (CARNEIRO; VITAL; PEREIRA, 2007).

Ainda de acordo com César (2011) os principais adesivos utilizados na fabricação de painéis de madeira são o fenol-formaldeído, o resorcinol-formaldeído, a ureia-formaldeído e melanina-formaldeído.

Os adesivos a base de resorcinol, um adesivo termoendurecedor, que possui alta resistência quando comparado a outras classes de adesivos, sendo assim é muito utilizado na confecção de vigas estruturais e até mesmo na confecção de outros materiais como papel, borrachas, têxteis, metais, vidro, cerâmicas e concreto. Contudo estes adesivos apresentam alto custo (ALBINO; MORI; MENDES, 2012).

A ureia-formaldeído (UF) apresenta como vantagens o baixo-custo, excelente homogeneidade e solubilidade em água e alta reatividade em meio ácido. Como desvantagens a UF possui baixa resistência à umidade e alta emissão de formaldeído, podendo esta acontecer desde a fabricação dos painéis e ao longo de toda a sua vida útil (DUNKY, 1998).

A resina melamínica ou como também é conhecido melamina-formaldeído, é caracterizada pela sua durabilidade e versatilidade também apresenta excelente resistência ao fogo e calor, a MF também proporciona uma melhor rigidez ao painel e possui boa resistência à umidade, no entanto apresenta como desvantagem alto custo. Para solução desse problema, há o processo de introdução de ureia com a melamina, formando então o adesivo MUF (melamina ureia formaldeído), que apresenta boas características e ainda torna o adesivo melamínico mais acessível (PAIVA, 2010).

A resina fenol-formaldeído foi o primeiro polímero sintético utilizado em escala comercial, foi desenvolvida no ano de 1900 pelo químico belga Leo Baekeland, e por muito tempo foi conhecida como baquelite (STEVENS, 1999).

A utilização do adesivo fenol-formaldeído proporciona ao painel como principal característica a alta resistência à umidade, podendo então ter aplicação

em uso exterior. Sua principal utilização se dá na fabricação de painéis compensados, painéis de fibra duras, painéis aglomerados estruturais e OSB (SANTOS, 2016).

Os adesivos à base de resina fenol-formaldeído, possuem uma coloração marrom avermelhado, teor de sólidos entre 48 a 51%, pH entre 11 a 13, viscosidade entre 300 a 600 cp, temperatura de cura entre 130 a 150° e podem ser armazenados por 4 a 5 meses em temperatura ambiente, devido a sua resistência a água pode ser até 2,5 vezes mais caro que a ureia-formaldeído (EMERSON, 2010).

Iwakiri *et al.* (2002) afirma que a escolha do adesivo para a produção de painéis é de suma importância, e os fatores a serem analisados dependerá do uso final das chapas.

3.6 Emissão de formaldeído

O formaldeído é dos componentes mais encontrados na fabricação de resinas, como exemplo a resina Fenol-formaldeído que é resultado da união de Fenol com o formaldeído. Essa resina é muito utilizada na produção de painéis, pisos laminados e móveis. Em temperatura ambiente, o formaldeído é um gás incolor que evapora com muita facilidade, um dos seus grandes problemas é o fato de ser inflamável e altamente reativo, ou seja, liga-se facilmente com outras substâncias, podendo originar produtos químicos e poluentes (ALVES; ALCIOLE, 2012).

Um dos grandes problemas causados pela fabricação de painéis está na resina utilizada pelas indústrias para a aglutinação dos painéis, que são à base de formaldeído, essa substância química não reage totalmente permanecendo uma parte no produto final, e que pode acarretar na emissão dessa substância tanto durante o uso quanto no final de vida do produto, mais ainda se houver o descarte inadequado, ressalta-se ainda que essas emissões internas ocasiona na exposição humana (SILVA, 2012; SKAAR; JORGENSEN, 2013; NAKANO *et al.*, 2018).

A etapa de prensagem dos painéis é uma das principais, contudo é também uma etapa onde ocorre grande emissão de formaldeído. É na prensagem onde ocorre a definição das propriedades físicas e mecânicas dos painéis, e para isso a temperatura é elevada em até 200°C. Nesta fase há a liberação de de ar

acompanhado de pó e formaldeído, passando por um filtro de manga, o qual realiza a exaustão do ar, separando então o pó gerado do ar sendo este, encaminhado para a usina térmica e o ar com formaldeído é liberado na atmosfera (ARAÚJO *et al.*, 2020).

Um estudo desenvolvido por (GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2009) abordou a produção painéis no Brasil e na Espanha, este estudo analisou algumas categorias de impactos ambientais, dentre elas Aquecimento Global e Toxicidade Humana. Onde no contexto de produção no Brasil, a utilização bem como fabricação da resina Ureia-formaldeído foi considerada o principal hotspots (áreas de biodiversidade que estão passando por processos destrutivos) em diversas categorias. E o mesmo cenário ocorreu no estudo na Espanha, pois a emissão de formaldeído também foi um dos mais alarmantes.

Embasado nestes riscos ambientais e humanos, muitas pesquisas vêm sendo realizadas buscando novas alternativas que não apresentem alta toxicidade, dentre elas a utilização da lignina como um substituo parcial da utilização de resinas que contenham o formaldeído.

3.7 Lignina

A lignina é um biopolímero muito abundante na natureza, atualmente pouco explorado como matéria prima para produção de bens de primeira ordem, este desempenha funções essenciais nos organismos de várias espécies de vegetais. A lignina ainda apresenta alto potencial como substituto à diversas matérias-primas que muitas das vezes não provém da natureza, logo a lignina possui alto potencial de exploração no mercado de bens (SILVA *et al.*, 2019).

A madeira é a principal fonte de lignina no mundo, sendo ela um grande grupo de biopolímeros aromáticos, sendo também a segunda classe de biopolímeros mais abundantes na terra. A lignina representa cerca de 30% do peso da madeira, proporcionando a ela rigidez e propriedades antimicrobianas. A lignina é combinada com celulose e hemicelulose na biomassa, isso acaba limitando a bioconversão dos constituintes da madeira em produtos de segunda geração, esses processos geram uma grande quantia de lignina como subproduto, que é utilizada principalmente para geração de energia. Contudo há rotas alternativas

para a valorização da lignina, como por exemplo a utilização para produção de adesivos (TRIBOT *et al.*, 2019).

A lignina do processo Kraft (utilizado na fabricação de papel) é caracterizada como um composto que possui alto teor de grupos fenólicos livres, que são provenientes da hidrólise das ligações éter encontradas na lignina da madeira. Sua massa molelucar fica em torno de 1000 a 2000 g/mol, isso se deve ao fato da degradação da lignina durante o processo de cozimento da madeira (FOELKEL, 1977).

De acordo com Luong *et al.* (2012) existe muitos estudos relacionados com o a conversão da lignina em novos produtos de alto valor agregado como fenóis e ácido acético, óleos, vanilina e gás de síntese (podendo ser convertido a metanol). Essa preocupação se deve ao fato de que muitas indústrias não conseguem consumir todo o licor negro produzido, sendo este licor negro.

Para Foelkel (2009) existem diversas possibilidades para se fazer o uso da lignina extraída da madeira, fugindo do uso apenas para geração de energia. De acordo com Alonso *et al.* (2004) a lignina possui alto potencial para usos industriais, como por exemplo na síntese de adesivos para madeira.

Em seu estudo Magalhães *et al.* (2019) encontrou como resultado que a substituição de ureia-formaldeído para lignina pode ser feita em até 50% sem afetar nenhuma propriedade dos painéis do tipo compensado.

A lignina kraft no entanto, possui baixa reatividade com o formaldeído, tornando a sua utilização em adesivos fenólicos para madeira um processo muito dificultoso, isso também ocorre devido ao baixo número de anéis aromáticos livres (PIZZI; MITTAL, 2017).

A partir do exposto na revisão, pode-se observar que a substituição de lignina no adesivo fenol-formaldeído pode surgir como uma alternativa sustentável e econômica para a indústria de painéis, pois se comprovada a eficácia no desempenho físico-mecânico dos painéis pode surgir como uma proposta viável e promissora.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

As principais matérias-primas utilizadas neste estudo foram as lâminas de madeira e três formulações de adesivos diferentes, para essas formulações foram utilizados o adesivo fenol-formaldeído comercial, o fenol cristal e a lignina em pó.

As lâminas de madeira foram de Pinus, estas foram provenientes de doação de uma indústria da região. As mesmas quando chegaram ao campus estavam em dimensão comercial (Figura 1), então foram dimensionadas com auxílio técnico na CNC e então passaram a ter as dimensões de 450 x 450 mm aproximadamente, com espessura de cerca de 2 mm.

Figura 1: Lâmina em dimensão comercial



Fonte: Autoria própria.

A lignina utilizada neste estudo é um subproduto do processo de polpação kraft, sendo proveniente de doação de empresa do setor de papel e celulose (Figura 2).

Figura 2: Lignina utilizada



Fonte: Autoria própria.

A mistura da lignina ao fenol-formaldeído foi realizada pelo processo de fenolação, este processo foi realizado para melhor homogeneização da lignina no adesivo, para isso foi utilizado o fenol cristal (Figura 3).

Figura 3: Fenol cristal



Fonte: Autoria própria.

As três formulações de adesivos utilizadas foram:

- Adesivo 1: Fenol-formaldeído comercial;
- Adesivo 2: Fenol-formaldeído comercial com substituição parcial de 10% de lignina;
- Adesivo 3: Fenol-formaldeído comercial com substituição parcial de 20% de lignina.

4.2 Preparo do adesivo Fenol-formaldeído com substituição de lignina

A gramatura utilizada para cada painel foi determinada a partir da gramatura do adesivo fenol-formaldeído que é de 395 g/m² e pela área da lâmina 450 mm x 450 mm, com isso para cada linha de cola será necessário aproximadamente 73 g de adesivo, um total de 292 g por painel. Devido a possíveis perdas, foi produzido 400 g da mistura para cada painel fabricado.

Para a substituição de 10% foi utilizada 40 g de lignina, e de fenol cristal utilizou-se 30% do peso restante de adesivo fenol-formaldeído, ou seja, 102 g de fenol cristal e 238 g de fenol-formaldeído. O mesmo foi realizado para a porcentagem de 20% (Figura 4).

Figura 4: Mistura de lignina ao adesivo



Fonte: Autoria própria.

Para o processo de diluição de lignina, o fenol cristal foi aquecido em banho maria na temperatura de 60°C até o estado líquido e, então, gradativamente adicionou-se a lignina em pó, sempre agitando por cerca de uma hora até que a diluição fosse completa. O processo está apresentado na Figura 5.

Figura 5: Preparo do adesivo



Fonte: Autoria própria.

4.3 Classificação das lâminas

Após o seccionamento as lâminas foram submetidas a classificação visual de acordo com o documento normativo ABNT NBR ISO 2426-2: 2006. Segundo o documento normativo as lâminas devem estar situadas em 5 categorias diferentes: classe 1 as melhores lâminas isentas de qualquer defeito visível, a classe 2 com pequenos defeitos e assim sucessivamente. As piores lâminas classificadas como 5, não foram utilizadas neste trabalho (Figura 6).

Figura 6: Classificação visual das lâminas



Fonte: Autoria própria.

Então, as lâminas com menor incidência de defeitos foram utilizadas nas camadas mais externa dos compensados e as que possuíam algum tipo de defeito foram utilizadas nas partes mais internas dos painéis, devido a configuração das regiões com maior e menor solicitação em condições de uso, respectivamente.

4.4 Produção dos painéis

A produção dos painéis de compensado com as lâminas de Pinus, ocorreu no Laboratório de Painéis de Madeira da Unesp – Campus de Itapeva, onde para o início da produção as lâminas foram secas em estufa por 24 horas a $103 \pm 3^{\circ}\text{C}$ (Figura 7), até atingir umidade em torno de 5%, ideal para a fabricação, esse processo foi realizado um dia antes da produção.

Figura 7: Acomodação das lâminas na estufa



Fonte: Autoria própria.

A Figura 8 apresenta a estufa utilizada.

Figura 8: Estufa utilizada na secagem das lâminas



Fonte: Autoria própria.

Com as lâminas já secas, enquanto resfriavam, foi realizada a dosagem de adesivo, onde com o auxílio de uma balança semi-analítica com precisão de 0,01 g foram pesadas a quantidade de cola necessária para cada linha de cola dos painéis, ou seja, 83 g sendo 10 g a mais do que o necessário pois parte do adesivo fica retido no recipiente.

Pesou-se em separado a quantidade de adesivo necessária para cada linha de cola. Em seguida, foi realizada a aplicação da cola sobre as faces das lâminas, com a utilização de uma espátula para espalhar o adesivo por toda a superfície da lâmina, como visto da Figura 9.

Figura 9: Aplicação do adesivo na lâmina



Fonte: Autoria própria.

Na sequência do processo as lâminas com a resina foram conduzidas a pré-prensa sem temperatura, para facilitar a transferência de adesivo entre as lâminas com pressão de aproximadamente 2 kgf/cm² por 5 minutos (Figura 10).

Figura 10: Pré-prensagem dos painéis



Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, o painel foi levado para a prensagem a quente a 6 kgf/cm², a uma temperatura de 180°C por 10 minutos, dividida em três ciclos de prensagem com 3 minutos cada e 30 segundos de alívio de pressão, esse processo foi realizado em prensa hidráulica (Figura 11).

Figura 11: - Prensa hidráulica com capacidade de carga de 80 toneladas.



Fonte: Autoria própria.

Após o resfriamento em temperatura ambiente, os mesmos painéis foram esquadrejados e então, obtidos os corpos de prova, de acordo com as especificações normativas para a realização dos testes descritos nos objetivos do presente trabalho (Figura 12).

Figura 12: Corpos de prova seccionados para a realização dos testes físicos e mecânicos.



Fonte: Autoria própria.

4.5 Ensaio físicos

Os testes físicos realizados foram: massa específica, teor de umidade e inchamento em espessura.

4.5.1 Massa específica

O ensaio de massa específica aparente foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 9485: 2011. Foram retirados 7 corpos de prova dos painéis produzidos para cada tratamento, nas dimensões de 100 x 50 x 13 mm.

Foi determinada a massa dos corpos de prova em uma balança digital com precisão de 0,01g. Posteriormente foram realizadas as medidas das dimensões dos corpos de prova, sendo as medidas de comprimento, largura e espessura de cada amostra. Para o procedimento de medida do comprimento e largura, foi utilizado um paquímetro digital com precisão de 0,01mm e para as medições de espessura foi utilizado um micrômetro digital com precisão de 0,001mm.

Com os dados coletados foi realizado o cálculo da massa específica através da Equação 1.

$$\rho = \frac{m}{c \cdot l \cdot e} \quad (1)$$

Onde:

ρ : Massa específica (g/cm³);

c: comprimento (cm);

l: largura (cm);

e: espessura (cm).

4.5.2 Teor de Umidade

O ensaio de teor de umidade foi realizado segundo a norma ABNT NBR 9484: 2011, para esse teste foram utilizados os mesmos corpos de prova do ensaio de massa específica, em total de 6 corpos de prova por tratamento (Figura 13).

Figura 13:Corpos de prova utilizados



Fonte: Autoria própria.

Primeiramente todos os corpos de prova foram pesados numa balança digital com precisão de 0,01g, e então foram levados à estufa laboratorial com temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, permanecendo por 24 horas, quando atingiram massa constante. Após a coleta desses dados, foi realizado o cálculo dos teores de umidade de acordo com a Equação 2.

$$TU = \frac{mu - ms}{ms} * 100 \quad (2)$$

Onde:

TU : Teor de umidade (%);

mu: massa úmida (g);

ms: massa seca (g).

4.5.3 Inchamento em espessura

O ensaio de inchamento foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 9535:2011. Os corpos de prova foram confeccionados seis corpos de prova por tratamento na dimensão de 60 x 10 mm, sendo a dimensão de comprimento perpendicular às fibras.

Os corpos de prova foram divididos em duas séries de três, sendo uma série de controle conforme especificação normativa. Então, foi feita a medição da espessura na região central, com o auxílio de um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm, para cada uma das amostras. A série de controle foi então levada para a estufa por 24 horas à temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, e novamente tiveram as medidas de espessura retiradas. A outra série foi submetida à imersão em água por 24 horas e em seguida novamente foi feita a medição das espessuras, e então essa amostra foi levada para secar em estufa à $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 horas, e por fim novamente foram medidas as espessuras.

Com os dados obtidos, foi calculada a recuperação em espessura, o inchamento mais recuperação em estufa e por fim o inchamento através das Equações 3, 4 e 5, respectivamente.

$$R = \left(\frac{e_1 \times e_5}{e_2 \times e_3} \right) \times 100 \quad (3)$$

Onde:

R: recuperação em espessura (%);

e_1 : é a soma das espessuras iniciais dos corpos de prova de controle (mm);

e_2 : é a soma das espessuras dos corpos de prova utilizados como controle secos em estufa (mm);

e_3 : é a soma das espessuras iniciais dos corpos de prova antes a imersão dos corpos de prova (mm);

e_5 : é a soma das espessuras dos corpos de prova após a imersão em água (mm).

$$IR = \left(\frac{e_1 \times e_4}{e_2 \times e_3} - 1 \right) \times 100 \quad (4)$$

Onde:

IR: é o inchamento mais recuperação da espessura (mm);

e_4 : é soma das espessuras dos corpos de prova após imersão em água, e secos em estufa (mm);

$$I = IR - R \quad (5)$$

Onde:

I: é o inchamento em espessura do corpo de prova (mm).

4.6 Ensaio mecânicos

Os testes mecânicos realizados foram: resistência à flexão estática paralela e perpendicular, para a determinação do Módulo de Elasticidade (MOE) e Módulos de ruptura (MOR) e também o ensaio de Cisalhamento na linha de cola.

4.6.1 Flexão estática

Os ensaios de flexão estática foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 9533: 2012. Foram utilizados quatro corpos de prova por tratamento, tanto para flexão paralela quanto para flexão perpendicular, os quais possuíam a direção das lâminas paralelas ao seu comprimento, na flexão paralela e a direção das fibras das lâminas perpendiculares ao seu comprimento. As dimensões dos corpos de prova foram de 75 mm de largura e em média de 11 mm de espessura da chapa. O comprimento do corpo de prova foi determinado através da equação 6, de acordo com a especificação da norma.

$$c = 25 * e + 50 \quad (6)$$

Onde:

c: é o comprimento do corpo de prova (mm);

e: espessura do corpo de prova (mm).

Sendo de aproximadamente 11 mm a espessura dos corpos de prova, pela equação temos um comprimento de 325 mm.

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC, do Laboratório de Propriedades dos Materiais da UNESP – Itapeva. De acordo com a Figura 14.

Figura 14: Ensaio de flexão realizado na EMIC



Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova foram arranjados de acordo com as especificações da norma ABNT NBR 9355: 2012. Houve apenas um ciclo de carga na realização do ensaio, como sugerida. As Equações 7 e 8 apresentam o cálculo do MOE e do MOR, respectivamente.

$$MOE = \frac{L^3 \times (F_2 - F_1)}{4 \times l \times e^3 \times (S_2 - S_1)} \quad (7)$$

Onde:

MOE: é o módulo de elasticidade (MPa);

L: é a distância entre os centros de apoio (mm);

l: é a largura do corpo de prova (mm);

e : é a espessura do corpo de prova (mm);

$F_2 - F_1$: é o incremento de carga no trecho reto da curva-deformação, sendo F_2 relativa a carga de ruptura de 40% (N);

$S_2 - S_1$: é o incremento de deflexão no ponto central do vão (mm).

$$MOR = \frac{3 \times F_{m\acute{a}x} \times L}{2 \times l \times e^2} \quad (8)$$

Onde:

MOR: é a tensão de ruptura à flexão estática (MPa);

$F_{m\acute{a}x}$: é a carga de ruptura (N).

4.6.2 Cisalhamento da linha de cola

O ensaio de cisalhamento na linha de cola foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR ISO 12466-1:2012. Onde utilizou-se nove corpos de prova de cada um dos adesivos utilizados, produzidos de tal forma que a direção da grã da camada entre as linhas de cola submetidas ao ensaio, ficassem perpendicular ao comprimento do corpo de prova. Na Figura 15 apresenta o corpo de prova utilizado para os testes.

Figura 15: Corpo de prova utilizado no ensaio de cisalhamento



Fonte: Autoria própria.

O ensaio foi realizado na máquina universal de ensaios EMIC, do Laboratório de Propriedades dos Materiais da UNESP – Itapeva, seguindo todas as instruções descritas na norma (Figura 16).

Figura 16: Realização do ensaio de cisalhamento na linha de cola.



Fonte: Autoria própria.

4.7 Análise Estatística

Por fim os dados de todos os ensaios realizados foram coletados, e foi realizada a análise estatística, sendo realizada a ANOVA com nível de significância de 5%, e também o teste de Tukey, visando a comparação entre as médias dos tratamentos. Para evidenciar a diferença existente entre os tratamentos, utilizou-se as letras para comparação das médias pelo teste de Tukey. O software utilizado foi o R versão 3.4.2 de 2017.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios físicos e mecânicos estão dispostos em forma de tabela. Os mesmos foram utilizados para a realização da análise estatística.

5.1 Massa específica

Na Tabela 1, estão presentes os resultados obtidos no ensaio físico de massa específica, na mesma está presente o resultado de todas as proporções utilizadas, o valor entre parêntesis indica o desvio padrão das médias de cada um.

Tabela 1: Resultados de massa específica e, respectivo desvio padrão.

%Lignina	0	10	20
Média (g/cm ³)	0,555 A (0,05)	0,566 A (0,03)	0,582 A (0,02)

Fonte: Autoria própria (2023).

Embora estatisticamente não tenham sido observados diferenças significativas, numericamente ocorre aumento da densidade com a substituição de lignina. Comparando os resultados obtidos neste estudo com o catálogo da ABIMCI, os valores obtidos estão também superiores.

De acordo com Schueler (2017) o aumento da densidade do painel proporciona à redução de até 50% da emissão de formaldeído. Comparando os resultados obtidos neste estudo com o catálogo da ABIMCI, os valores obtidos estão também superiores.

Sugere-se ainda que, se a redução da emissão de formaldeído tiver acontecido, pode ser explicada pelo de lignina kraft possuir muitos grupos desconhecidos ao longo de sua estrutura, que podem ter interagido com o formaldeído, impedindo então a sua liberação, permanecendo retido no adesivo.

5.2 Teor de umidade

A Tabela 2 estão apresenta os resultados obtidos no teste para determinação do teor de umidade, o valor entre parêntesis indica o desvio padrão das médias para cada tratamento.

Tabela 2: Teor de umidade

%Lignina	0	10	20
Média	11,70 B (0,46)	9,62 A (0,54)	9,82 A (0,18)

Fonte: Autoria própria (2023)

A partir da análise dos resultados obtidos para o ensaio de teor de Umidade, nota-se que a substituição de lignina tornou o painel menos susceptível a umidade, dado o fato da lignina ser uma substância hidrofóbica. Isso foi comprovado pelos resultados obtidos no teste, ocorrendo até diferença estatística significativa com a substituição de lignina.

Ainda comparada com a literatura, Silva (2012) obteve resultados de 11,46% para teor de umidade em painéis compensados de pinus, sendo os obtidos com a substituição de lignina superiores. Ferreira et al. (2022) encontrou uma média de 12,61% para o ensaio de teor de umidade, superior ao encontrado neste trabalho utilizando a lignina.

5.3 Inchamento em espessura

Na Tabela 3 estão presentes os resultados médios obtidos para o ensaio de inchamento em espessura. Destaca-se que para esse ensaio não foi possível realizar análise estatística devido a sistemática do teste pedir várias etapas e não haver número de corpos de prova suficientes para repetições.

Tabela 3: Valores médios para o teste de Inchamento em espessura

%Lignina	0	10	20
Média	4,32	5,40	4,41

Fonte: Autoria própria (2023)

Os resultados de inchamento em espessura não eram esperados para a substituição de lignina em 10%, pois foram superiores aos demais. Tal resultado pode ter disso influenciado pela qualidade inferior das lâminas utilizadas, que tiveram pior qualidade de colagem pois alguns corpos de prova sofreram delaminação, ou seja, abriram durante o período de imersão, isso pode ter acontecido devido à qualidade inferiores das lâminas bem como a não homogeneidade das mesmas, como pode ser observada na Figura 17.

Contudo para a porcentagem de 20%, os resultados permaneceram próximos aos dos painéis onde não houve a substituição de lignina. Contudo também não se observou piora nos resultados.

Figura 17: Delaminação do corpo de prova



Fonte: Autoria própria.

5.4 Flexão estática

As Tabelas 4 e 5, apresentam os resultados obtidos no teste de flexão estática, tanto para a direção paralela quanto perpendicular às fibras, respectivamente.

Tabela 4: Flexão estática na direção paralela às fibras

% Lignina	MOR (MPa)	MOE (MPa)
0	31,31 A (11,69)	3749 A (776,10)
10	31,39 A (18,09)	4053 A (1115)
20	23,77 A (17,48)	3467 A (2179)

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 5: Flexão estática na direção perpendicular às fibras

% Lignina	MOR (MPa)	MOE (MPa)
0	23,07 A (3,79)	1415 A (570,70)
10	23,89 A (11,00)	1647 A (410,00)
20	20,82 A (10,81)	1574 A (417,70)

Fonte: Autoria própria (2023)

Analisando os valores obtidos no ensaio de flexão estática, pôde-se observar que tanto para o ensaio perpendicular, quanto para o ensaio paralelo às fibras, não houve diferença estatística, logo a substituição de lignina não promoveu melhoramento nesta característica mecânica dos painéis.

A partir dos estudos encontrados na literatura, nota-se que os resultados para este ensaio são predominantemente superiores ou iguais ao encontrado neste estudo, como evidenciado por Júnior e Garcia (2004), que tiveram como resultados de resistência (MOR) e rigidez (MOE) à flexão estática no sentido paralelo às fibras de 34MPa para MOR e 4474 MPa para MOE, no sentido perpendicular às fibras 32 MPa para MOR e 3606MPa para MOE.

Comparando os resultados obtidos com o catálogo normativo da ABIMCI, os resultados tanto para o paralelo às fibras quanto para perpendicular, apenas os valores de MOR ficaram dentro do estabelecido, os valores de MOE ficaram pouco abaixo do mínimo.

5.5 Cisalhamento na linha de cola

Na Tabela 6, encontram-se os resultados obtidos para o ensaio de cisalhamento na linha de cola.

Tabela 6: Cisalhamento na linha de cola

% Lignina	tv (MPa)
0	2,41 A (0,60)
10	1,39 A (0,64)
20	1,15 A (0,55)

Fonte: Autoria própria (2023)

Para o ensaio de qualidade de colagem, notou-se que também não houve diferença estatísticas entre os resultados obtidos, contudo fazendo uma análise numérica conforme adicionou-se lignina houve uma redução na tensão de cisalhamento. Comparando os resultados com o catálogo da ABIMCI, os valores obtidos para os adesivos onde utilizou-se a lignina, não atingiram o valor mínimo.

Isso pode ser justificado pelo fato da substituição da Lignina em Fenol Cristal, o qual este ter prejudicado a estrutura molecular da Lignina utilizada, prejudicando então as propriedades mecânicas realizadas.

5.6 Quadro comparativo dos ensaios realizados

Os quadros 1 e 2 apresentam uma comparação de todos os ensaios realizados neste estudo para os três tratamentos realizados, bem como os valores encontrados no relatório da ABIMCI.

Quadro 2: Comparação dos valores obtidos no estudo para os ensaios físicos com a norma

Ensaio Físico	Porcentagem de lignina substituída			Valor médio pelo relatório da ABIMCI
	0%	10%	20%	
Massa Específica (g/cm ³)	0,555	0,566	0,582	0,532
Teor de umidade (%)	11,70	9,62	9,82	-
Inchamento em espessura (mm)	4,32	5,40	4,41	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Quadro 3: Comparação dos valores obtidos para os ensaios mecânicos com a norma

Ensaio Mecânico	Porcentagem de lignina substituída			Valor médio pelo relatório da ABIMCI
	0%	10%	20%	
MOE paralelo (MPa)	3749	4053	3467	6766,5
MOR paralelo (MPa)	31,31	31,39	23,77	37,36
MOE perpendicular (MPa)	1415	1647	1574	2784,00
MOR perpendicular (MPa)	23,07	23,89	20,82	24,81
Cisalhamento	2,41	1,39	1,15	1,47

Fonte: Autoria própria (2023)

6. CONCLUSÃO

Pode-se concluir por este estudo, que a substituição de lignina ao adesivo, utilizando o método de fenolação, ocasionou melhoras nas propriedades físicas dos painéis compensados, com ênfase no teste de teor de umidade, o qual apresentou diferenças estatísticas significativas, melhorando seu comportamento, logo pode dizer que a substituição de lignina tornou o painel menos susceptível a umidade, quando exposto em temperatura ambiente. Isso pode ser justificado pelo fato de que a lignina é uma substância hidrofóbica.

Para os ensaios mecânicos, percebe-se que não houve melhora em seu desempenho mecânico, contudo também os valores obtidos para os painéis com substituição de lignina não diferiram daqueles que foram fabricados apenas com o adesivo Fenol-formaldeído. Pode-se sugerir ainda que, a utilização do fenol cristal pode ter sido o responsável pelo não melhoramento das propriedades mecânicas, visto que ele pode prejudicar a estrutura molecular da lignina.

Outros estudos realizados utilizando lignina junto ao adesivo, como o estudo realizado por Magalhães (2019), indicam que a substituição por lignina pode ser realizada em uma porcentagem de até 50%, sem afetar as propriedades do painel, o que favorece as condições de aplicabilidade dos mesmos. Também a metodologia utilizada neste estudo se mostrou superior à algumas outras utilizadas em outras pesquisas, estas metodologias como por exemplo realizar tratamento térmico na lignina, prejudicou as propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

Sugere-se para novos estudos, outras metodologias de substituição de lignina aos adesivos a base de formaldeído, visto que este estudo já apresentou melhorias no quesito de qualidade das propriedades físicas dos painéis compensados com madeira de Pinus.

REFERÊNCIAS

- ALBINO, V. C. d. S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Influência das características anatômicas e do teor de extrativos totais da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden na qualidade da colagem. **Ciência Florestal**, v. 22, p. 803-811, 2012.
- ALONSO, M. V. *et al.* Determination of curing kinetic parameters of lignin–phenol–formaldehyde resol resins by several dynamic differential scanning calorimetry methods. **Thermochimica Acta**, [S.l.] v. 419, n. 1-2, p. 161-167, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2004.02.004>
- ALVES, C. A.; ALCIOLE, S. D. G. Formaldeído em escolas: uma revisão. **Química Nova**, [S. l.], v. 35, n. 10, p. 2025-2039, 2012.
- ARAÚJO, C. K. d. C. *et al.* **Práticas de economia circular no sistema produtivo de painéis de madeira**. Orientador: Cassiano Moro Piekarski. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020.
- ASSIS, T. F. de. Estratégias de melhoramento para obtenção de madeira de qualidade para laminação e serraria. *In*: **SEMINÁRIO DE MADEIRA DE EUCALIPTO: TENDÊNCIAS E USOS**, 2001, Curitiba. Anais [...]. Curitiba, 2001. p. 1-18.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9484**: Compensado: determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9485**: Compensado: determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9535**: Compensado: determinação do inchamento. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9533**: Compensado: determinação da resistência à flexão estática. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS Técnicas - ABNT. **NBR 12466-1**: Painéis de madeira compensada: Qualidade de colagem. Rio de Janeiro: ABNT; 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE (ABIMCI). **Catálogo técnico de compensados de pinus**. Curitiba, 2002. 20 p.
- BALDWIN, R. F. **Plywood manufacturing practices**. M. Freeman Publications Rev., 1981. 300p.
- BORBOLETTO JÚNIOR, G.; GARCIA, J. N. Propriedades de resistência e rigidez à flexão estática de painéis osb e compensados. **Revista Árvore, SciELO Brasil**, v. 28, p. 563–570, 2004.

CARNEIRO, A. C. O., VITAL, B. R., PEREIRA, F. A., et al., “**Adesivos e sua importância na indústria madeireira**”, *In*: Oliveira, J. T. S., Fiedler, N. C., et al. (eds.). *Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro*. Vitória - ES: Aquarius, 2007. cap. 4.

CÉSAR, A. **Estudo da interação adesivo-partícula em painéis OSB (Oriented Strand Board)**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) — Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

DUNKY, M. Urea–formaldehyde (uf) adhesive resins for wood. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, [S. l.] v. 18, n. 2, p. 95–107, 1998.

EMERSON, D. W. V. **Métodos de análise de formaldeído e otimização da reação de Hantzchen**. Orientador: Umberto Klock. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

FERREIRA, B. S. *et al.* Physical and Mechanical Properties of Plywood Produced with Thermally Treated Pinus taeda Veneers. **Forests**, [S. l.], v. 13, n. 9, p. 1398, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13091398>

FERREIRA, B. S.; SILVA, J. V. F.; CAMPOS, C. I. de. Static bending strength of heat-treated and chromated copper arsenate-treated plywood. **BioResources**, [S. l.] v. 12, n. 3, p. 6276–6282, 2017.

FERREIRA, M. Escolha de espécies de eucalipto. **Circular Técnica IPEF**, Brasil, v. 47, p. 1–30, 1979.

FOELKEL, C. **Química dos processos de produção de celulose**. Belo Oriente: CENIBRA/UFV, 1977- 1979. Apostilas Curso Mestrado UFV 1977 a 1979. Disponível em: <https://www.celso-foelkel.com.br/artigos/ufv/03.%20Qu%EDmica%20dos%20Processos%20de%20Produ%EAo%20de%20Celulose.%201977.1979.pdf>

FOELKEL, C. Individualização das fibras da madeira do eucalipto para a produção de celulose kraft. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, v. 2, p. 107, 2009.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. *et al.* Environmental performance assessment of hardboard manufacture. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Springer, v. 14, p. 456–466, 2009.

IRLE, M. A. *et al.* 10 wood composites. **Handbook of wood chemistry and wood composites**, CRC Press, v. 321, 2012.

IWAKIRI, S. História: Característica tecnológicas e aplicações. **Revista da madeira**, [S.l.], v. 71. p. 8, 2003.

IWAKIRI, S.; ALBUQUERQUE, C.; KEINERT JÚNIOR, S. **Adesão e adesivos**. *In*: IWAKIRI, S. (org.). *Painéis de madeira reconstituída*. Curitiba: FUPEF, 2005. cap. 1. p. 1 – 30.

IWAKIRI, S. *et al.* Produção de compensados de pinus taeda e pinus oocarpa com resina fenol-formaldeído. **Cerne**, Universidade Federal de Lavras, v. 8, n. 2, p. 92–97, 2002.

JANKOWSKY, I. P.; AGUIAR, O. J. de. Manufatura de painéis compensados som eucalyptus: Caracterização de diversas espécies. **Floresta**, Curitiba, v. 14, n. 1, p. 46-47, 1983.

JÚNIOR, J. B. G. *et al.* Painéis compensado de eucalipto: estudo de caso de espécies e procedências. **Cerne**, Universidade Federal de Lavras, v. 15, n. 1, p. 10–18, 2009.

KAZMIERCZAK, S.; HILLIG, E.; IWAKIRI, S. Painéis compensados fabricados com lâminas de três espécies de eucaliptos. **Floresta e Ambiente, SciELO Brasil**, v. 24, 2017.

LUONG, N. D. *et al.* An eco-friendly and efficient route of lignin extraction from black liquor and a lignin-based copolyester synthesis. **Polymer bulletin**, Springer, v. 68, n. 3, p. 879–890, 2012.

MAGALHÃES, M. A. d. *et al.* Adição de lignina Kraft à resina fenólica para a fabricação de compensados. [S. l.] **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 10, n. 2, p. 142-149, 2019. doi: 10.12953/2177-6830/rcm.v10n2p142-149

MARCHESAN, R. *et al.* **Avaliação do efeito de diferentes técnicas de cura na resistência de compósitos de cimento e lignina.** *In:* Robson José de Oliveira. (org.). Engenharia florestal: contribuições, análises e práticas em pesquisa. 1 ed. [S. L.]: Editora Científica Digital Ltda, 2022, v. 1, p. 58-75. <https://www.editoracientifica.com.br/books/livro-engenharia-florestal-contribuicoes-analises-e-praticas-em-pesquisa>

MARRA, A. A. **Technology of wood bonding.** Van Nostrand Reinhold, 1992. 454p.

MATTOS, R. L. G.; CHAGAS, F. B. d.; GONÇALVES, R. M. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 27 , p. 121-156, mar. 2008.

MENDOZA, Z. M. d. S. H. d. **Efeito da inclusão laminar nas propriedades de painéis aglomerados fabricados com resíduos da indústria laminadora.** Orientador: Benedito Rocha Vital. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 2010.

NAKANO, K. *et al.* Life cycle assessment of wood-based boards produced in japan and impact of formaldehyde emissions during the use stage. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Springer, v. 23, p. 957–969, 2018.

PAIVA, N. T. N. d. **Desenvolvimento de uma resina ureia-formaldeído de baixa emissão de formaldeído fortificada com melamina.** Orientador: Fernão D. Magalhães. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Química) – Universidade do Porto. Faculdade de engenharia, 2010.

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Ed.). **Handbook of adhesive technology**. Boca Raton, CRC press, 2017.

RIBASKI, N. G. Conhecendo o setor florestal e perspectivas para o futuro. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 1, n. 1, p. 44–58, 2018.

SANTOS, L. C.. **Síntese e caracterização de adesivos lignina-fenol-formaldeído para madeira e derivados**. 2016. 43f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2016.

SELLERS, T. **Plywood and adhesive technology**. New York: M. Dekker, 1985.

SILVA, B. P. d. S.. *et al.* PRODUÇÃO DE ADESIVO A PARTIR DA LIGNINA RESIDUAL DE PROCESSO INDUSTRIAL. *In: MOCCIF19-4ª Edição da Mostra Científica e Cultural do IFSP Suzano*. 2019.

SILVA, D. A. L. **Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil**. Orientador:Francisco Antonio Rocco. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e aplicações de materiais) — Universidade de São Paulo, 2012.

SILVA, D. A. L. *et al.* Life cycle assessment of medium density particleboard (MDP) produced in Brazil. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, p. 1404-1411, 2013.

SCHUELER, M. V. E. **Painéis aglomerados de madeira-casca com baixa emissão de formaldeído**. 2017. 42 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ, 2017.

SKAAR, C.; JØRGENSEN, R. B. Integrating human health impact from indoor emissions into an LCA: a case study evaluating the significance of the use stage. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, p. 636-646, 2013.

STEVENS, M. P. **Polymer chemistry**. New York: Oxford university press, 1990.

TRIBOT, A. *et al.* Wood-lignin: Supply, extraction processes and use as bio-based material. **European Polymer Journal**, Elsevier, v. 112, p. 228–240, 2019.

TSOUMIS, G. *et al.* **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. Van Nostrand Reinhold New York, 1991. v. 115. 494p.

VIEIRA, M. C.; BRITO, E. O.; GONÇALVES, F. G. Evolução econômica do painel compensado no brasil e no mundo. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, Instituto de Florestas/UFRRJ, v. 19, n. 3, p. 277–285, 2012.

WALKER, J. C. F. **Primary wood processing: principles and practice**. Springer Science & Business Media, 2006. 596p.

YOUNGQUIST, J. A. **Wood-based composites and panel products.** *In:* WOOD handbook : wood as an engineering material. Madison, WI : USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL ; GTR-113. cap. 10. p. 1-31 <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/7157>