

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

CRISTIANE KARYN DE CARVALHO ARAUJO

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO ADESIVO FENOL FORMALDEÍDO POR LIGNINA
KRAFT NA PRODUÇÃO DE COMPENSADO**

GUARATINGUETÁ

2024



CRISTIANE KARYN DE CARVALHO ARAUJO

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO ADESIVO FENOL FORMALDEÍDO POR LIGNINA
KRAFT NA PRODUÇÃO DE COMPENSADO**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, para obtenção do título de Grau acadêmico Doutora em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais

Orientadora: Prof. Dr^a. Cristiane Inácio de Campos.

Coorientador: Prof. Dr. José Cláudio Caraschi.

Guaratinguetá

2024

A663s	Araújo, Cristiane Karyn de Carvalho Substituição parcial do adesivo fenol formaldeído por lignina kraft na produção de compensado / Cristiane Karyn de Carvalho Araújo - Guaratinguetá, 2024. 93 f : il. Bibliografia: f. 83-91 Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024. Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Cristiane Inácio de Campos Coorientador: Prof. Dr. José Cláudio Caraschi 1. Painéis de madeira. 2. Resinas fenólicas. 3 Lignina. I. Título. CDU 620.1(043)
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Este trabalho visa trazer a sociedade e ao meio ambiente um produto menos tóxico a saúde humana, devido a redução do fenol pela lignina, além de ao mesmo tempo reduzir a emissão de formaldeído pela inserção da lignina, a qual atua como um produto preenchedor, que eleva a densidade do painel e consequentemente minimiza a emissão. Este trabalho traz uma inovação aos estudos nacionais e internacionais de adesivos pelo fato de trazer em sua composição um subproduto do processo de polpação. Considerando o desenvolvimento sustentável, este trabalho contribui com o conceito de economia circular, pois utilizando um adesivo mais sustentável a circularidade do produto aumenta e consequentemente facilita seu fim de vida.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This work aims to bring society and the environment a product that is less toxic to human health, due to the reduction of phenol by lignin, in addition to at the same time reducing formaldehyde emissions by inserting lignin, which acts as a filler product, which increases the density of the panel and consequently minimizes emissions. This work brings an innovation to national and international studies of adhesives because it includes a byproduct of the pulping process in its composition. Considering sustainable development, this work contributes to the concept of circular economy, since using a more sustainable adhesive increases the circularity of the product and consequently facilitates its end of life.

CRISTIANE KARYN DE CARVALHO ARAUJO

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTORA EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

 Documento assinado digitalmente
ANA PAULA ROSIFINI ALVES
Data: 05/09/2024 10:52:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Ana Paula Rosifini Alves
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:

 Documento assinado digitalmente
CRISTIANE INACIO DE CAMPOS
Data: 02/09/2024 11:05:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. CRISTIANE INACIO DE CAMPOS
Orientador – UNESP

 Documento assinado digitalmente
JULIANO FIORELLI
Data: 02/09/2024 16:24:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JULIANO FIORELLI
USP



Prof. Dr. RODRIGO SALVADOR
Danmarks Tekniske Universitet

 Documento assinado digitalmente
MARILIA DA SILVA BERTOLINI
Data: 03/09/2024 08:08:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. MARILIA DA SILVA BERTOLINI
UNESP

 Documento assinado digitalmente
GUSTAVO VENTORIM
Data: 02/09/2024 15:41:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. GUSTAVO VENTORIM
UNESP

AGOSTO de 2024

Dedico este trabalho e toda a minha
jornada a Deus e meus pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente sou agradecida a Deus pela oportunidade que me deu de chegar até esse momento, pelos pais que colocou em minha vida e que me incentivaram a buscar e correr atrás dos meus sonhos.

Vocês sempre foram minha base na vida, no estudo e no mundo. Vocês são exemplos de que eu poderia chegar aonde quisesse e me dediquei especialmente para esse resultado todos os dias da minha vida. Esse doutorado é prova do amor e apoio incondicional de vocês. Certamente não chegaria até onde estou sem os pais dedicados e amorosos que tive. A vocês, meu muito obrigado! Dedico essa tese e toda minha jornada a vocês.

Agradeço as minhas irmãs Sâmella, Sâmique e Camilla, vocês são a minha base, nos momentos em que as vezes pensava em desistir, vocês estavam ali com um ombro amigo me aconselhando a não desistir, me fazendo rir e deixando essa caminhada mais leve. Amo muito vocês e me faltam palavras para descrever o que me representam. Vocês são minha inspiração!

E não poderia deixar de agradecer, meus queridos sobrinhos (Helloísa, Bernardo e Izabel) que sempre me alegravam nos momentos difíceis.

Aos meus amigos de caminhada acadêmica, minha gratidão por todo apoio, por todo aprendizado que me proporcionaram, o meu muito OBRIGADA!

E por último, mas não menos importante, a Minha orientadora/amiga que me conduziu nessa caminhada com todo amor e carinho, me apoiando em todas as etapas, somente agradecer por todo o cuidado que teve comigo desde a graduação até o doutorado. De orientadora foi se tornando minha amiga, minha inspiração, meu exemplo de pessoa a seguir. Que Deus possa retribuir tudo o que fez por mim, somente GRATIDÃO.

Agradeço ao meu coorientador pela dedicação e apoio em me auxiliar.

Agradeço também, aos técnicos Tiago, Alex e Juscelino que sempre estavam dispostos a me auxiliar em tudo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Se você tem um sonho, lute por ele, mesmo que todos te chamem de louco, sonhador e tentem de impedir de realizá-lo. Afinal, o sonho é teu, e o único que deve acreditar nele é você”

P. C. Brunório

RESUMO

Com o constante crescimento do setor moveleiro e da construção civil, os painéis de madeira tornaram-se fundamentais para suprir a grande demanda por madeira serrada, porém, enfrentar adequadamente a gestão dos resíduos gerados ao longo das fases de produção é um desafio significativo, inclusive no mercado de painéis de madeira, onde o adesivo utilizado na composição apresenta um impacto ambiental considerável. Com o intuito de minimizar esse impacto, este estudo concentrou-se na avaliação do desempenho tecnológico resultante da adição de lignina Kraft à resina fenol-formaldeído (FF) nas propriedades dos painéis de madeira compensada fabricados a partir de madeira de Pinus. Este trabalho foi realizado a partir de três métodos: 1º Método: Fenolação da Lignina + Fenol formaldeído (FF), 2º Método: Mistura da Lignina + Fenol-formaldeído sob ação de tempo e temperatura e 3º Método: Síntese fenólica + Lignina, buscando a melhor homogeneização entre a lignina e adesivo, além de melhores resultados de aplicação. A lignina foi substituída parcialmente em duas porcentagens (10% e 20%), para isso, 10% e 20% do fenol formaldeído foi retirado e acrescentado 10% e 20% de lignina. Após preparação das resinas para os três diferentes métodos, as mesmas foram submetidas ao teste termogravimétrico, a fim de analisar as mudanças no comportamento de cura e estrutura térmica, além da determinação do teor de sólidos, viscosidade e pH. Na sequência os painéis foram produzidos com lâminas de madeira de Pinus taeda, compactadas com as misturas anteriormente descritas, sob ação de pressão e temperatura. Os painéis foram seccionados para obtenção de corpos de prova para a realização dos ensaios físico-mecânicos segundo especificações normativas da ABNT. Os ensaios físico-mecânicos foram realizados 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) na flexão estática nas direções paralela e perpendicular às fibras das lâminas externas. Os dados obtidos evidenciaram que a substituição parcial do adesivo fenol formaldeído pela lignina Kraft indica bom desempenho físico-mecânico dos painéis de madeira compensada. Para algumas propriedades as caracterizações apontaram valores superiores aos encontrados em painéis de compensado produzidos apenas com o fenol formaldeído. Dentre os métodos analisados, a que apresentou melhor desempenho para os painéis foi o Método 2, composto pela mistura da Lignina + Fenol

Formaldeído sob ação de tempo e temperatura, além disso, pode-se concluir que a adição de lignina ao adesivo fenólico não afetou as propriedades dos painéis e garantiu maior resistência à água.

Palavras-chave: painel compensado; fenol-formaldeído; lignina kraft residual; adesivo verde.

ABSTRACT

With the constant growth of the furniture and civil construction sector, wooden panels have become fundamental pieces to meet the great demand, however, adequately addressing the management of waste generated throughout the production phases is a significant challenge, including in the market. of wooden panels, where the adhesive used in the composition has a considerable environmental impact. To minimize this impact, this study focused on evaluating the technological performance resulting from the addition of Kraft lignin to phenol-formaldehyde (FF) resin on the properties of plywood panels manufactured from Pine wood. This work was divided into three stages: 1st Stage: Phenolation of Lignin + Phenol formaldehyde (FF), 2nd Stage: Mixing of Lignin + Phenol-formaldehyde under the action of time and temperature and 3rd Stage: Phenolic synthesis + Lignin, seeking the best homogenization between lignin and adhesive, in addition to better application results. Lignin was partially replaced in two percentages (10% and 20%), for this, 10% and 20% of phenol formaldehyde were removed and 10% and 20% of lignin were added. After preparing the mixtures, they were subjected to thermogravimetric testing, in order to analyze changes in curing behavior and thermal structure, solids content and viscosity. Next, the panels were produced with sheets of Pinus taeda wood, compacted with the mixtures previously described, under the action of pressure and temperature. The panels were sectioned to obtain specimens for carrying out the physical-mechanical tests. The physical-mechanical tests were carried out following the guidelines of the ABNT normative documents to determine the density, moisture content, swelling in thickness, bonding quality and to determine the modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) at static bending in directions parallel and perpendicular to the fibers of the outer laminae. The data obtained showed that the partial replacement of phenol formaldehyde adhesive by Kraft lignin indicates good physical- mechanical performance of plywood panels, with some properties showing values higher than those found in plywood panels produced only with phenol formaldehyde. Among the formulations tested, the one that performed best for the panels was Stage 2, composed of a mixture of Lignin + Phenol Formaldehyde under the influence of time and temperature.

Keywords: plywood panel; phenol-formaldehyde; residual kraft lignin; green sticker.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Artigos publicados.....	19
Figura 2: Co ocorrências de palavras-chaves.....	20
Figura 3: Produção mundial de painéis de madeira	22
Figura 4: Produção nacional de painéis de compensado, partículas e fibras a partir de 1961.....	23
Figura 5: Estrutura do compensado.....	24
Figura 6: Etapas de produção de compensado.....	27
Figura 7: Fenol formaldeído.....	31
Figura 8: Estrutura do metanal	33
Figura 9: Estrutura da lignina Kraft de coníferas	36
Figura 10: Estrutura da lignina Kraft de folhosa	36
Figura 11: Lâminas de Pinus comercial	40
Figura 12: Fenol cristalizado utilizado no primeiro método do processo	41
Figura 13: Lignina Kraft residual.....	42
Figura 14: Materiais.....	43
Figura 15: Preparo do adesivo	44
Figura 16: Preparação da Mistura	45
Figura 17: Reator para confecção do adesivo	46
Figura 18: Adesivos síntese da resina fenólica com a lignina	47
Figura 19: Estrutura Gel time	48
Figura 20: Classificação visual das lâminas	50
Figura 21: Lâminas na estufa.....	50
Figura 22: Aplicação do adesivo nas lâminas	51
Figura 23: Pré prensagem do painel já confeccionado	52
Figura 24: Prensagem a quente utilizada	53
Figura 25: Painéis de madeira compensada com lignina.....	53
Figura 26: Corpos de prova utilizados.....	55
Figura 27: Corpos de prova de inchamento.....	56
Figura 28: Ensaios de flexão realizada na EMIC	58
Figura 29: Corpos de prova ensaio de cisalhamento	59
Figura 30: Ensaio de cisalhamento na linha de cola	60
Figura 31: Diagramas da análise calorimétrica para os tratamentos	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quantidade dos reagentes utilizados nas sínteses das resinas LPF	47
Tabela 2: Valores obtidos na caracterização das resinas	61
Tabela 3: Valores médios de Densidade e desvio padrão para todos os tratamentos estudados.....	64
Tabela 4: Valores médios de Teor de Umidade e desvio padrão para todos os tratamentos estudados	65
Tabela 5: Valores médios de inchamento	67
Tabela 6: Valores médios de módulo de elasticidade e desvio padrão para todos os tratamentos estudados	68
Tabela 7: Valores médios de Módulo de ruptura e desvio padrão para todos os tratamentos estudados.....	69
Tabela 8: Valores médios de Módulos de elasticidade – PE e desvio padrão para todos os tratamentos estudados.....	70
Tabela 9: Valores médios de Módulos de ruptura – PE e desvio padrão para todos os tratamentos estudados	71
Tabela 10: Valores médios Cisalhamento e desvio padrão para todos os tratamentos estudados.....	72
Tabela 11: Densidade	74
Tabela 12: Teor de Umidade.....	75
Tabela 13: Cisalhamento na linha de cola.....	76
Tabela 14: MOR-PE e MOR-PA.....	77
Tabela 15: MOE-PE e MOE-PA	78
Tabela 16: Melhor método para confecção do painel	80

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO	16
1.1.1	Objetivos específicos	16
2	JUSTIFICATIVA.....	17
3	CONSTRUÇÃO DO REFERENCIAL TEÓRICO	19
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
4.1	PAINÉIS DE MADEIRA.....	21
4.2	PAINÉIS DE MADEIRA COMPENSADA	23
4.2.1	Painéis de madeira compensada no Brasil	25
4.2.2	Processo produtivo de compensado	26
4.3	ADESIVOS PARA FABRICAÇÃO DE PAINÉIS	29
4.4	QUALIDADE DE COLAGEM	32
4.5	EMIÇÃO DE FORMALDEÍDO	33
4.6	LIGNINA	34
4.6.1	Lignina kraft	35
4.7	PRODUÇÃO DE PAINÉIS UTILIZANDO ADESIVOS COM LIGNINA ..	37
5	METODOLOGIA	39
5.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	39
5.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	39
5.2.1	Materiais	39
5.2.2	Métodos.....	42
5.3	CARACTERIZAÇÃO DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DAS MISTURAS	47
5.4	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO ADESIVO	48
5.4.1	Gel time	48
5.4.2	Teor de sólidos.....	49
5.4.3	Viscosidade.....	49
5.4.4	pH	49
5.5	PRODUÇÃO DE PAINÉIS COMPENSADO.....	49
5.5.1	Classificação das lâminas	49
5.5.2	Confecção dos painéis	50
5.6	CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS.....	54
5.6.1	Densidade.....	54
5.6.2	Teor de Umidade.....	55

5.6.3	Inchamento em espessura	56
5.6.4	Flexão estática	57
5.6.5	Cisalhamento na linha de cola	59
5.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA	60
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
6.1	CARACTERIZAÇÃO DOS ADESIVOS.....	61
6.2	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	63
6.3	PROPRIEDADES FÍSICAS	64
6.3.1	Densidade.....	64
6.3.2	Teor de Umidade.....	65
6.3.3	Inchamento em espessura	66
6.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS	68
6.4.1	Módulos de ruptura (MOR) e Módulo de elasticidade (MOE) paralelo..	68
6.4.2	Módulo de ruptura (MOR) e módulo de Elasticidade (MOE) perpendicular	70
6.4.3	Qualidade de colagem – resistência ao cisalhamento (Tv).....	72
6.5	COMPARAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA ENTRE OS 3 MÉTODOS DE ADIÇÃO DE LIGNINA	73
6.5.1	Densidade.....	74
6.5.2	Teor de Umidade.....	75
6.5.3	Cisalhamento na linha de cola	76
6.5.4	Módulo de Ruptura Perpendicular (MOR-PE) e Paralelo (MOR-PA)....	77
6.5.5	Módulo de Elasticidade Perpendicular (MOE-PE) e Paralelo (MOE-PA)	78
6.6	RESUMO DOS RESULTADOS FÍSICO-MECÂNICO	79
7	CONCLUSÃO	81
7.1	ESTUDOS FUTUROS	82
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos maiores desafios enfrentados pelos mais variados setores da indústria é a destinação apropriada dos resíduos gerados antes, durante e após a produção, o que não é diferente no mercado de painéis à base de madeira. Os painéis de madeira são produtos de alto valor agregado (SANTOS, 2017), compostos pela madeira em diversas fases de desagregação, como lâminas, sarrafos, partículas e fibras que são expostas à pressão e temperatura nas mais variadas etapas, onde são adicionados adesivos formando um novo produto, alternativa à madeira maciça (GONÇALVES et al., 2018).

Os painéis derivados de madeira vêm apresentando, nos últimos anos um número crescente de aplicações em diversos segmentos industriais, com destaque para a indústria moveleira e construção civil, podendo ser aplicado estruturalmente ou não.

Estruturalmente os painéis vêm ganhando maior espaço e notoriedade quando se trata de sistemas construtivos industrializados, principalmente na América do Norte e Europa, onde boa parte das construções são todas ou parcialmente à base de madeira. Dentre os painéis que podem ser empregados nesses sistemas construtivos destaca-se as chapas de madeira compensada (APA, 2011), por apresentar composição em camadas defasadas de 90°, onde se consegue um ganho de resistência mecânica nas duas principais direções.

Os painéis de madeira compensada são estruturas à base de madeira compostas por um número ímpar de lâminas com direções de grã paralelas e perpendiculares entre as camadas (OGAWA et al., 2019). A característica de ortogonalidade das lâminas adjacentes permite a redução da anisotropia natural da madeira e aumenta a estabilidade dimensional, fazendo com que a diferença das propriedades nas diferentes direções diminua. Irle (2012) afirma que o compensado quando comparado com a madeira maciça, apresenta propriedades mecânicas mais isotrópicas e maior resistência à ruptura.

Destaca-se ainda que o uso dos painéis de madeira compensada apresenta grande aplicação em sistemas construtivos industrializados como o Wood Frame e Steel Frame. No entanto, especificações técnicas como a Diretriz SINAT nº 005 – revisão 2 (2017) e, mais recentemente, a norma ABNT NBR 16936 - Edificações em light wood frame (2023) determinam que o uso de painéis à base de madeira para

os sistemas construtivos mencionados anteriormente precisa garantir durabilidade, a qual se garante pela qualidade e composição dos adesivos utilizados.

Na literatura, são apresentados diversos estudos abordando a fabricação de painéis de madeira à base de resina fenol-formaldeído, ureia-formaldeído e resina poliuretana à base de óleo de mamona, que, em comparação com as resinas à base de formaldeído, demandam menor energia para cura e não liberam formaldeído, componente tóxico ao homem e ao meio ambiente (FERRO et al.2018; SILVA et al. 2017; PIEKARSKI, 2013).

Com esse crescimento, surge a necessidade de desenvolver um material com produção mais sustentável que atenda às necessidades do segmento industrial, prezando pela durabilidade e qualidade quando comparado a outros produtos. Consonante a isto, propõe-se a utilização do adesivo fenol-formaldeído com substituição parcial pela lignina, que é um subproduto que pode ser obtido a partir do licor negro na caldeira de recuperação de polpação Kraft, na forma solubilizada, atualmente destinada à geração de energia.

A lignina, possui anéis benzênicos interligados por átomos de carbono, baixa solubilidade em água e alto conteúdo fenólico (SPIRIDON, 2018). Devido a essas características, a lignina inserida no adesivo, visa aumentar a qualidade dos painéis e diminuir a toxicidade de seus processos, além de reduzir custos da produção (LUCKMAN et al., 2021). Segundo de Carvalho Araújo et al., (2022) para a indústria de painéis de madeira, utilizar um adesivo considerado mais sustentável implica em redução dos impactos ambientais (por exemplo, extinção de parte de componentes não biológicos usados em sua fabricação) já que o principal impacto ambiental relacionado aos painéis de madeira está no uso de resinas sintéticas (SILVA et al., 2013; PIEKARSKI, 2017) os quais dificultam a disposição final do produto devido aos componentes tóxicos presentes no mesmo.

Embasado nos riscos ambientais e humanos provocados pelo uso de adesivos à base de formaldeído, este estudo tem por objetivo mitigar esses riscos, adotando a implementação de uma produção ecoeficiente, que conseqüentemente, num futuro próximo, permita a reciclagem e a gestão de resíduos ligados aos painéis de forma correta. Assim, buscou-se substituir parcialmente o fenol formaldeído por lignina Kraft para a produção de compensado, e, identificar o melhor método de incorporação dessa lignina na resina comercial fenol- formaldeído, visando a redução da quantidade de resina com formaldeído na composição do painel, além de, avaliar

a viabilidade de adicionar lignina residual ao processo, em questões de resistências físicas e mecânicas dos painéis.

Atualmente a literatura ainda carece de trabalhos relacionados a abordagem deste estudo em painéis de madeira compensada, assim, este trabalho visa uma nova oportunidade de obtenção de um painel mais “ecologicamente correto”.

1.1 OBJETIVO

O presente estudo visa substituir parcialmente o adesivo fenol formaldeído pela lignina Kraft para a produção de compensado a partir de três diferentes métodos.

1.1.1 Objetivos específicos

- Avaliar a mistura de resina fenólica comercial com substituição 10% e 20% por lignina residual usando como solvente o fenol cristalino (Método 1);
- Avaliar a mistura de resina fenólica com substituição de 10% e 20% por lignina residual usando como agente, tempo e temperatura (Método 2);
- Avaliar a resina fenólica com substituição de 10% e 20% por lignina residual, usando o processo de síntese (Método 3);
- Caracterizar os adesivos a partir das 3 diferentes formulações,
- Analisar as propriedades físico-mecânicas dos painéis produzidos com substituição de 10% e 20% de lignina junto à resina fenólica (Método 1, 2 e 3);
- Avaliar estatisticamente as propriedades dos painéis a partir dos 3 métodos de inserção da lignina e, compará-los com literaturas e normas vigentes.

2 JUSTIFICATIVA

A substituição parcial do adesivo fenol formaldeído pela lignina Kraft em processos de produção de painéis não apenas reflete uma busca por aprimoramentos tecnológicos, mas também ambientais e econômicos (SANTOS et.al, 2015). Abordar essa mudança é essencial em um contexto em que a sustentabilidade e a redução do impacto ambiental são metas prioritárias para a indústria. Neste estudo optou-se pela substituição parcial do adesivo pela lignina oriunda o processo de polpação, já que a mesma é estruturada por fenóis, assim como o adesivo comercial.

A lignina Kraft, um subproduto da indústria de papel e celulose, apresenta-se como uma alternativa atraente ao fenol formaldeído, que é derivado de recursos fósseis, caracterizando-se como não renovável (PIZZI e MITTAL, 1994) e está associado a preocupações ambientais significativas. Neste contexto pode-se citar alguns aspectos ambientais que podem justificar a substituição parcial do fenol-formaldeído pela lignina:

- **Origem Renovável:** A lignina é derivada de fontes renováveis, sendo um subproduto do processamento de madeira para a produção de celulose. Essa característica contribui para a redução da dependência de recursos não renováveis, alinhando-se a uma abordagem mais sustentável.
- **Redução da Pegada de Carbono:** A produção de fenol formaldeído tradicionalmente contribui para a emissão de gases de efeito estufa. Ao substituir parte desse adesivo por lignina, que é um subproduto do processo de produção de celulose, é possível reduzir a pegada de carbono associada aos painéis.
- **Menor Impacto na Biodiversidade:** A extração de fenol formaldeído a partir de recursos fósseis pode envolver processos de mineração que impactam negativamente a biodiversidade. A utilização de lignina como alternativa minimiza esse impacto, uma vez que é derivada de materiais vegetais.
- **Ciclo de Vida Sustentável:** A substituição parcial do fenol formaldeído pela lignina pode contribuir para a sustentabilidade do ciclo de vida dos produtos, sendo que o fenol-formaldeído é o principal fator que impede a destinação correta dos painéis após o fim de vida (de CARVALHO ARAÚJO et al., 2022; PIEKARSKI et al., 2017; SILVA et al., 2013). Isso significa considerar não apenas a produção, mas também o uso e o descarte, promovendo práticas mais

sustentáveis ao longo de todo o ciclo.

- **Menor Toxicidade:** O fenol formaldeído é conhecido por sua alta toxicidade, representando riscos à saúde humana e ao meio ambiente. A lignina, por sua vez, é menos tóxica, proporcionando um ambiente de trabalho mais seguro e reduzindo os impactos negativos na saúde e na natureza.

A proposta de adicionar lignina a resina fenol formaldeído é torná-la menos agressiva ao homem e ao meio ambiente, além de dar um destino mais viável economicamente a lignina.

Essa mudança representa um passo significativo em direção à produção de painéis mais sustentáveis e alinhados aos princípios da economia circular

3 CONSTRUÇÃO DO REFERENCIAL TEÓRICO

Buscando a ascensão de uma visão mais precisa da produção científica sobre o tema em questão, conduziu-se uma análise bibliométrica que abordou os principais temas envolvidos nesta pesquisa. A análise foi conduzida utilizando o banco de dados da Web of Science (Periódicos Capes), no qual palavras presentes em títulos, resumos e palavras-chave foram examinadas para estabelecer correlações entre os temas investigados e a evolução da pesquisa na área ao longo do tempo.

A fim de identificar estudos semelhantes ao em questão foram investigados os termos em conjunto ***phenol formaldehyde, lignin e (plywood panel)*** para obter uma visão geral do início e desenvolvimento da pesquisa, resultando em 38 artigos identificados. O que mostra que esse assunto ainda é recente e necessita de aprofundamentos quando se trata da dessas diretrizes.

O Figura 1 apresenta a quantidade de artigos publicados por ano, relacionados ao tema estudado.

Figura 1: Artigos publicados

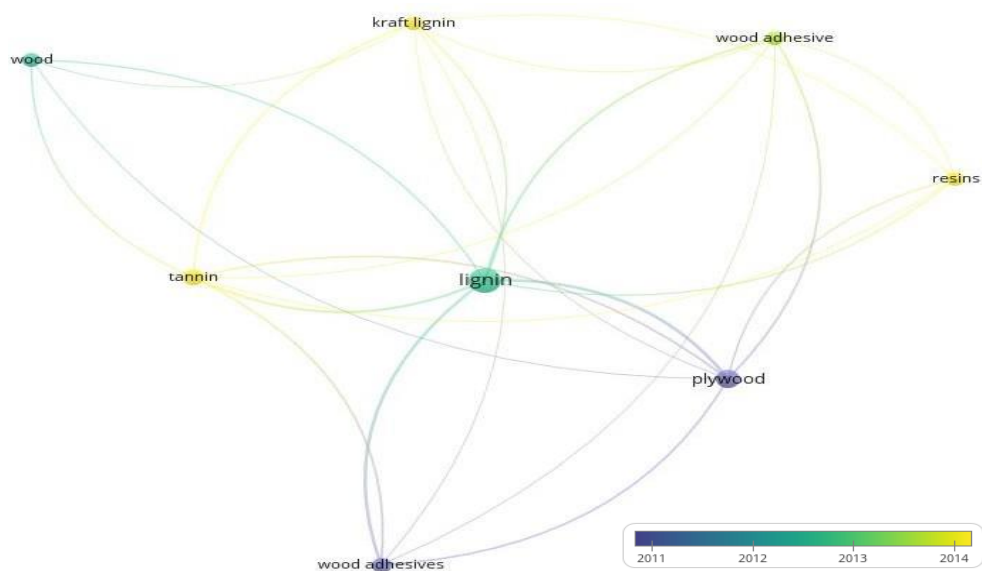


Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 2 foi gerada por meio do visualizador do Sistema Operacional Virtual (VOS-viewer) e representa a rede de palavras-chave mais frequentemente associadas aos termos "lignina" e "madeira". Essa forte correlação pode ser atribuída ao fato de a lignina ser um polímero natural presente na própria composição da

madeira. Na Figura 2, o tamanho dos círculos reflete a proporção da ocorrência da palavra-chave nos artigos analisados. A cor amarela indica documentos mais recentes, enquanto a cor roxa representa publicações mais antigas. A seleção desses artigos foi realizada por meio da análise dos títulos, palavras-chave e resumos das pesquisas. Dos 34 estudos analisados, apenas 3 continham informações relevantes para o tema em questão.

Figura 2: Co ocorrências de palavras-chaves



Fonte: Elaborada pelo autor

Observando a carência de estudos que abordam a temática, optou-se pela aplicação do método conhecido como "Snowballing" para complementar o portfólio bibliográfico. O "Snowballing" revelou-se altamente eficaz na identificação de estudos relevantes, utilizando como ponto de partida estudos previamente selecionados por meio de outros métodos. Os artigos identificados estão referenciados ao longo deste estudo e desempenharam um papel fundamental na construção do referencial teórico e na obtenção dos resultados.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica relacionada aos temas painéis de madeira, painéis de madeira compensada, painéis de madeira compensada no Brasil, adesivos para fabricação de painéis, interação de colagem, emissão formaldeído, lignina, lignina Kraft e produção de painéis utilizando adesivos com lignina.

4.1 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).

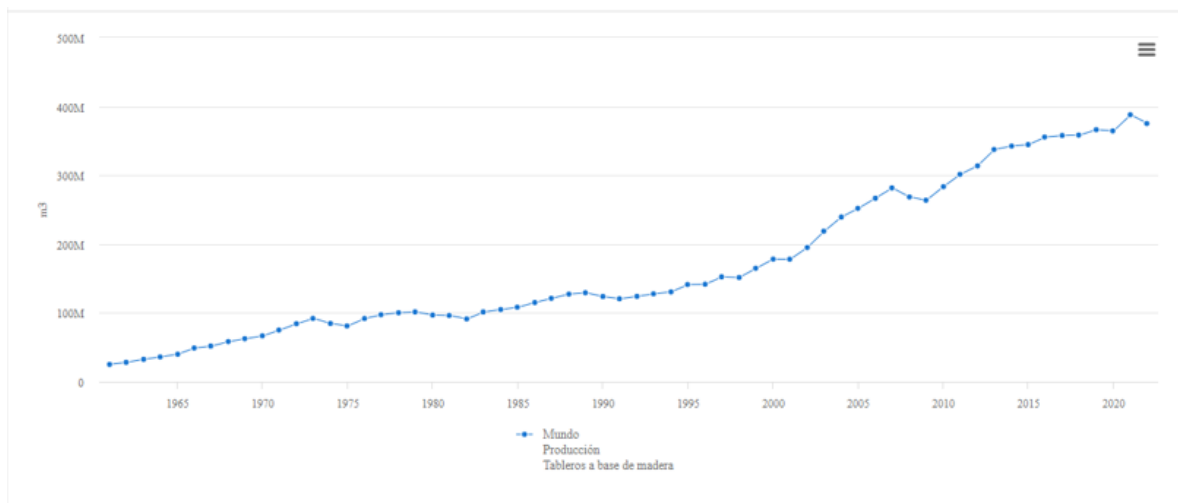
Os painéis são produtos derivados da madeira e podem ser classificados em duas categorias:

- **Madeira sólida:** são os painéis de madeira classificados mecanicamente, compostos por lâminas (compensado e laminados) ou sarrafos de madeira; e
- **Reconstituídos:** confeccionados a partir de partículas ou fibras de madeira reconstituída, tendo como principais produtos: os aglomerados/ *Medium Density Particleboard* (MDP), *Medium Density Fiberboard* (MDF), *Hard Density Fiberboard* (HDF), *Super Density Fiberboard* (SDF) e chapas isolantes (BIAZUS et al, 2010; IWAKIRI, 2005). Esta classe engloba ainda outros materiais compósitos, como os painéis cimento-madeira, plástico-madeira e outros lignocelulósicos.

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 engenheirados, na construção civil e, também, como substituto aos materiais de origem não renovável, como por exemplo os petroquímicos (MARCHESAN et al., 2022).

A produção mundial de painéis à base de madeira cresceu muito a partir de 1961 passando de uma produção de pouco mais de 25 milhões de m³ em 1961 para mais de 375 milhões de m³ em 2022, segundo dados da FAO (2023) apresentados na Figura 3.

Figura 3: Produção mundial de painéis de madeira



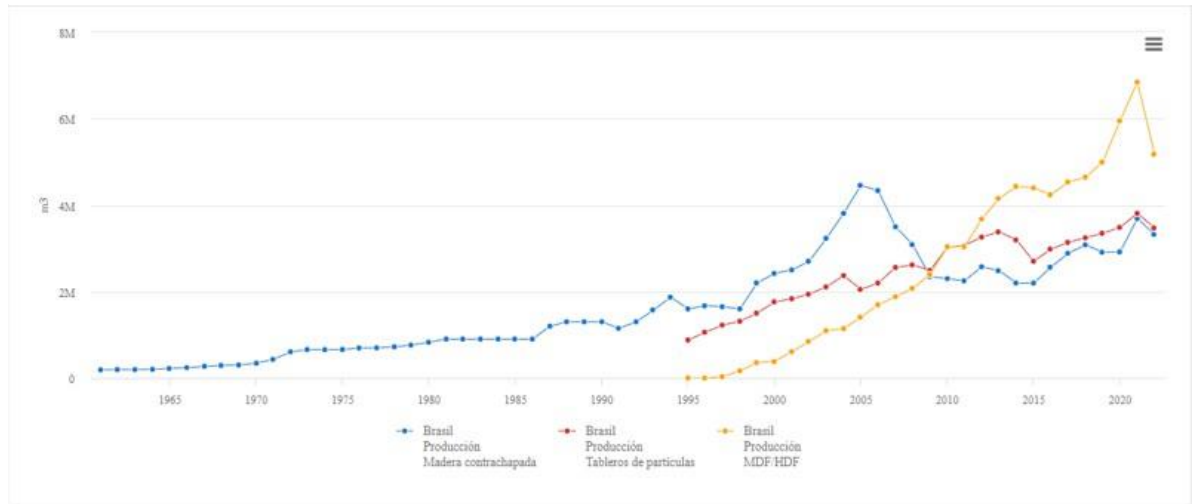
Fonte: FAO STAT (2024)

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 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 (FIGURA 4), contudo historicamente o painel Compensado é o tipo de

painel mais produzido no Brasil e 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.

Figura 4: Produção nacional de painéis de compensado, partículas e fibras a partir de 1961



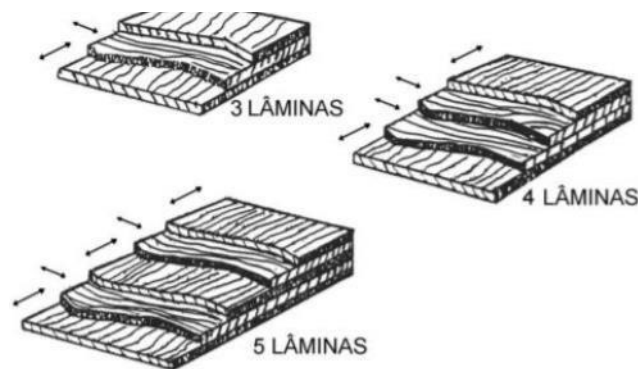
Fonte: FAO STAT (2024)

4.2 PAINÉIS DE MADEIRA COMPENSADA

O painel compensado é composto por um número ímpar de camadas, com a direção da grã perpendicular entre camadas adjacentes (LIMA, 2013). Esses painéis apresentam vantagens em relação à madeira maciça, pois proporcionam menor restrição ao uso, maior valor agregado e uma otimização do uso da matéria-prima. Além disso, eles se destacam como alternativas em comparação a outros produtos utilizados na construção civil, como caixarias e aplicações estruturais, levando em consideração as características da matéria-prima, que é renovável e biodegradável (BUZO et al., 2019).

O painel de madeira compensada é um exemplo de painel fabricado que possui excelente aplicação no uso estrutural. De acordo com Iwakiri, Albuquerque e 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 (Figura 5).

Figura 5: Estrutura do compensado



Fonte: Iwakiri (2005)

A estruturação dos painéis de madeira compensada conforme Figura 5, garante ao painel tanto uma melhor estabilidade dimensional como melhor distribuição da resistência nos sentidos longitudinal e transversal (IWAKIRI, 2005).

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 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. 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)

essas resistências a rachaduras são muito importantes 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).

4.2.1 Painéis de madeira compensada no Brasil

A primeira fábrica de painéis de madeira compensada foi instalada no Brasil no ano de 1940 no sul do país, e utilizava a madeira de Araucária angustifolia, popularmente conhecida por Pinheiro do Paraná (FERRAZ, 2013).

Devido a sua vasta extensão territorial e grande diversidade de recursos naturais, o Brasil se destaca como um dos maiores produtores e consumidores de compensado do mundo (FORMAPLAN, 2024).

A produção de painel de compensado no Brasil apresenta cerca de aproximadamente 80 anos. Quando se deu início a produção, destacava-se como principal matéria-prima a madeira Araucária proveniente das florestas nativas do sul do país (VIEIRA et al, 2012).

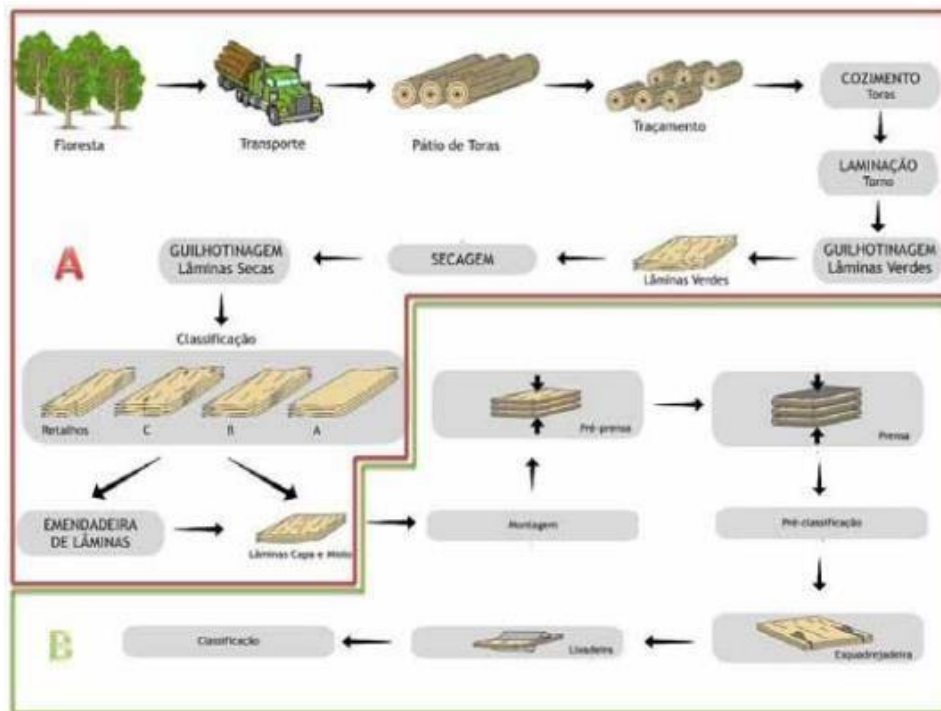
Atualmente produção de compensado é um processo altamente desenvolvido e eficiente, dentre as espécies de madeira mais utilizadas destacam-se o pinus, o eucalipto, imbuia (FORMAPLAN, 2024). No entanto, o país produz painéis de madeira de compensado de Pinus, provenientes de florestas plantadas nas regiões Sul e Sudeste do país, devido ao preço mais acessível que esta madeira permite.

Estima-se que o país detenha 200 fábricas de compensado em operação, as quais juntas detém uma capacidade instalada de produção de mais de 4 milhões de m³ anuais, cerca de 74% dessa produção de painel de compensado está voltado a atender o mercado externo (VIEIRA et al, 2012).

4.2.2 Processo produtivo de compensado

O fluxo do processo produtivo de uma fábrica de compensados é relativamente simples (Figura 6), envolve as seguintes atividades:

- Armazenamento das toras;
- Remoção da casca;
- Seccionamento;
- Aquecimento das toras;
- Laminação;
- Secagem;
- Aplicação do adesivo e Montagem;
- Pré-prensagem;
- Prensagem e Acabamento.

Figura 6: Etapas de produção de compensado

Fonte: Ferreira (2011)

- Armazenamento de toras (pátio de toras)

As toras carecem ser armazenadas em condições adequadas, por um período mínimo de tempo para evitar ou minimizar os problemas como: fendilhamento de topo, ocorrência de mancha azul, ataque de agentes biodegradadores e ocorrência de bactérias causando odores indesejáveis (IWAKIRI, 2005).

- Descascamento das toras

A casca é removida a tora a fim de minimizar o tempo de aquecimento, visto que a mesma se caracteriza como um material isolante. Considerando as espécies de madeira, as coníferas apresentam uma maior facilidade de descascamento quando comparadas com as folhosas.

Dentre os métodos de descascamento das toras têm-se a utilização de machado, aplicação de água sob pressão, sistema de tambor rotativo (método de fricção), descascador em anel (método de cisalhamento de cambio) e descascador do tipo “cilindro cortante” (IWAKIRI, 2005).

- Seccionamento

As toras que apresentam grandes comprimentos necessitam ser seccionadas em dimensões menores, conforme as dimensões das lâminas usadas na produção do compensado (IWAKIRI, 2005).

- Aquecimento das toras

Segundo Iwakiri (2005) o aquecimento tende a aumentar a plasticidade da madeira, tornando-a mais flexível reduzindo a ocorrência de fendas superficiais na lâmina durante o processo de corte.

Após aquecida, a faca desliza com mais facilidade na madeira, o que torna possível o corte das lâminas. As vantagens do aquecimento se caracterizam em maior produção de lâminas em toras menores e lâminas com superfícies mais lisas, com quebras reduzidas ao redor dos nós e menos defeitos (BALDWIN, 1995).

- Laminação

A laminação de madeiras pode ser confeccionada por meio de torno, faqueadeira e serra. O método de serra é o mais antigo e raramente empregado atualmente. O torno é o equipamento mais utilizado para a produção de lâminas para compensados (IWAKIRI, 2005).

- Secagem

O intuito da secagem das lâminas é minimizar seu teor de umidade para uma faixa propícia à sua colagem (BALDWIN, 1995). De acordo com Iwakiri (2005) a secagem visa reduzir o teor de umidade da madeira, com o mínimo de defeito, no menor tempo possível.

- Aplicação do adesivo e montagem do painel

A aplicação do adesivo nas lâminas deve ser feita de forma uniforme e na proporção adequada sobre a área que será colada, para que no processo de prensagem o adesivo possa fluir uniformemente através das camadas de lâmina. Esta aplicação pode ser realizada em uma ou nas duas faces da lâmina. A quantidade de adesivo necessária depende da espécie de madeira, qualidade da superfície, teor de umidade, tipo de adesivo, temperatura e umidade do ar, tempo de montagem e se a aplicação foi realizada em uma ou duas faces da lâmina (FRIHART e HUNT, 2010).

A montagem é operação de sobreposição das lâminas com adesivo, de acordo com a composição pré-estabelecida e obedecendo ao princípio de laminação cruzada (IWAKIRI, 2005).

- Pré-prensagem

A finalidade da pré-prensagem é preparar o compensado para a prensagem final, facilitando o carregamento da prensa principal e conferindo menor tempo e melhor qualidade de colagem ao produto final (ABIMCI, 2004b). Para Iwakiri (2005) a pré-prensagem facilita o carregamento da prensa, auxilia na transferência e distribuição do adesivo entre as lâminas, aumenta a qualidade da colagem e a produtividade, e reduz os defeitos de fabricação.

-Prensagem

De acordo com Kollmann; Kuenzi e Stamm (1975) a prensagem pode ser realizada com aquecimento ou sem aquecimento, a prensagem sem aquecimento necessita de mais tempo para a cura do adesivo que a prensagem com aquecimento. Baldwin (1995) comenta que na prensagem com aquecimento, a pressão em si tem a função de promover o contato entre as lâminas, enquanto o calor tem a função de curar o adesivo. Segundo Iwakiri (2005) o processo de prensagem a quente, mais comumente utilizado, possui as seguintes variáveis de ciclo de prensagem que devem ser controladas: pressão, temperatura e tempo de prensagem.

- Acabamento

O painel passa pelo processo de acabamento, caracterizado pelo esquadreamento, para ajustar o painel nas medidas desejadas e a calibração e o lixamento, que têm por finalidade o ajuste em espessura e a eliminação de pequenas imperfeições da face melhorando o acabamento superficial (IWAKIRI, 2005).

4.3 ADESIVOS PARA FABRICAÇÃO DE PAINÉIS

Desde os primórdios dos tempos a madeira vem sendo coladas, e inicialmente as mesmas eram coladas utilizando substâncias naturais, como piche, alcatrão, gomas, peles e ossos de animais, porém com o passar do tempo e com as novas tecnologias surgiram novos produtos que surgiram com o intuito de melhorar a colagem.

Segundo Iwakiri (2005), os adesivos são definidos como sendo materiais altamente aderentes, que possuem a capacidade de manter materiais unidos. Os adesivos podem ser classificados como sintéticos e naturais.

- **Sintéticos:** Provenientes da extração do petróleo e gás natural, destacam-se nesta categoria o fenol-formaldeído, ureia-formaldeído, melamina formaldeído, resorcinol-formaldeído;

- Naturais: São adesivos provenientes de produtos naturais, dentre eles amido, tanino (LOURENÇON et al., 2016), lignina (NAVARRETE et al., 2012), óleo de mamona (PAES et al., 2014).

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 et al., 2007).

César (2011) afirma que os principais adesivos utilizados na fabricação de painéis de madeira são o fenol-formaldeído, o resorcinol-formaldeído, a ureia-formaldeído e melanina-formaldeído, como característica todos a base de formaldeído. O que não difere na produção de painel de madeira compensada que utilizam o fenol-formaldeído como matéria prima de colagem.

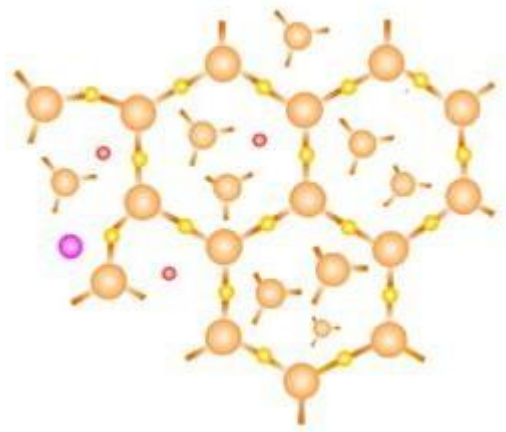
A ureia-formaldeído (UF) apresenta como vantagens o baixo-custo, excelente homogeneidade e solubilidade em água e alta reatividade em meio ácido. Como desvantagens a UF possui baixa resistência à umidade e alta emissão de formaldeído, que pode ocorrer desde a sua fabricação, fabricação dos painéis e ao longo de sua vida útil. (DUNKY, 1998; PIEKARSKI, 2017).

Os adesivos a base de resorcinol, são adesivos termo endurecedor, que possuem como característica 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 materiais como papel, borrachas, têxteis, metais, vidro, cerâmicas e concreto. Contudo estes adesivos apresentam alto custo (ALBINO; MORI; MENDES, 2009).

A resina melamínica ou como também é conhecida 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 et al., 2010).

A resina fenol-formaldeído (Figura 7) 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).

Figura 7: Fenol formaldeído



Fonte: Jia et al., (2020)

A utilização do adesivo fenol-formaldeído proporciona ao painel 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 ente 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).

Como exposto, a maior parte dos adesivos que compõe os painéis de madeira são oriundos de fontes não renováveis, advindos de compostos orgânicos do petróleo, o que os tornam relativamente caros, e ainda, apresentam riscos à saúde humana por apresentarem índices consideráveis de toxicidade (MAGALHÃES et al., 2019), buscando minimizar tais impactos ambientais e humanos, este estudo busca substituir parcialmente o adesivo fenol-formaldeído pela lignina, que apresenta uma estrutura similar ao fenol, tornando-a uma agente promissora para a síntese de resinas (PANG et al, 2017).

4.4 QUALIDADE DE 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; 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).

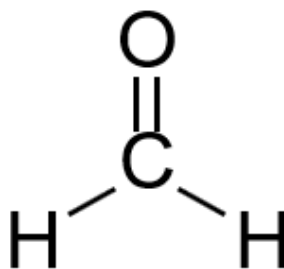
O teor de umidade da madeira também exerce grande influência sobre o processo de colagem, tempo de secagem e prensagem das lâminas dos compensados. No processo de produção o teor de umidade das lâminas é realizado em função do adesivo a ser utilizado na colagem (IWAKIRI; ALBUQUERQUE; JUNIOR, 2005).

Dado o exposto é de suma importância realizar uma escolha adequada da madeira a ser utilizada na produção, bem como atentar-se com a qualidade da mesma, para obtenção de um produto de melhor qualidade. Atualmente uma das madeiras mais utilizadas em estudos é o Pinus, devido as suas propriedades características.

4.5 EMISSÃO DE FORMALDEÍDO

O formaldeído ou metanal é o aldeído mais abundante na natureza, caracterizado por uma fórmula molecular simples (Figura 8). Caracteriza-se por ser um gás incolor com odor irritante, sufocante e característico, permitindo detectá-lo até em baixa concentração (AFINKO, 2019).

Figura 8: Estrutura do metanal



Fonte: Elabora pelo autor

Este composto orgânico é utilizado em diversos setores industriais, bem como, na indústria que fabricam de polímeros a base de ureia/fenol formaldeído. O formaldeído é dos componentes mais encontrados na fabricação de resinas, como exemplo a resina Fenol- formaldeído que é resultado da mistura 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 ocasionam 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 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).

GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2009 desenvolveu um estudo que abordou a produção de painéis de madeira no Brasil e na Espanha, este estudo analisou algumas categorias de impactos ambientais, dentre elas Aquecimento Global e Toxicidade Humana, onde considerando a produção no Brasil, a fabricação e utilização da resina Ureia-formaldeído foi considerada o principal hotspots (áreas de biodiversidade que estão passando por processos destrutivos) em diversas categorias, não sendo diferente cenário na Espanha, pois a emissão de formaldeído apresentou-se como mais alarmantes.

Embasado nestes riscos ambientais e humanos, muitas pesquisas vêm sendo realizadas buscando novas alternativas que não apresentem elevada toxicidade, dentre elas a utilização da lignina como um substituto parcial da utilização de resinas que contenham o formaldeído, já que a lignina é proveniente de fonte renovável.

4.6 LIGNINA

A lignina é a segunda biomacromolécula natural mais abundante e corresponde a cerca de 30% da madeira utilizada em processos industriais e geração de energia. Atualmente pouco explorada como matéria prima para produção de bens

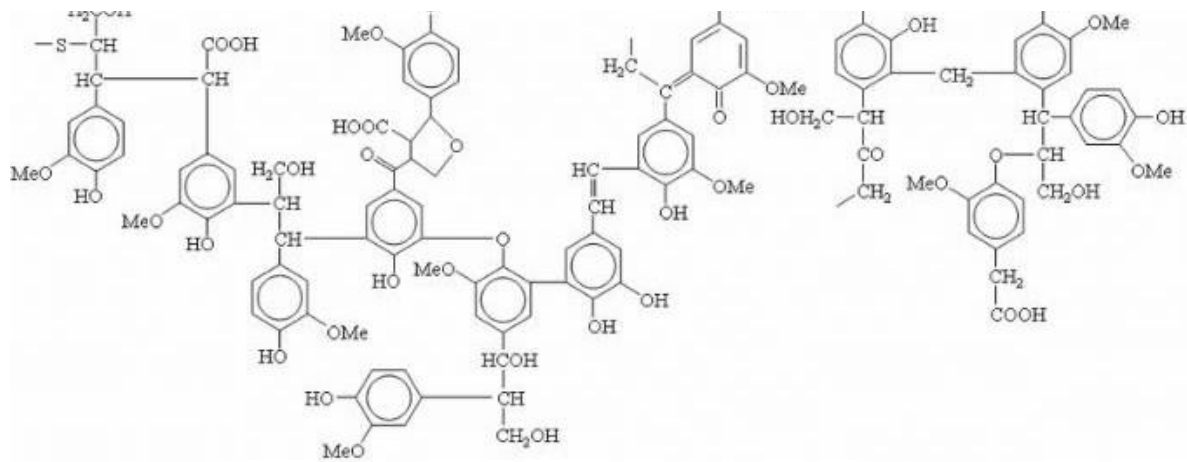
de primeira, sendo utilizada em aplicações que possuem baixo valor agregado, em sua grande maioria é queimada para geração de energia no processo de polpação da indústria de papel e celulose, porém a mesma se caracteriza como um subproduto promissor para a produção de novos materiais de fontes renováveis (SANTOS, 2014; MAGALHÃES 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 bi polímeros 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).

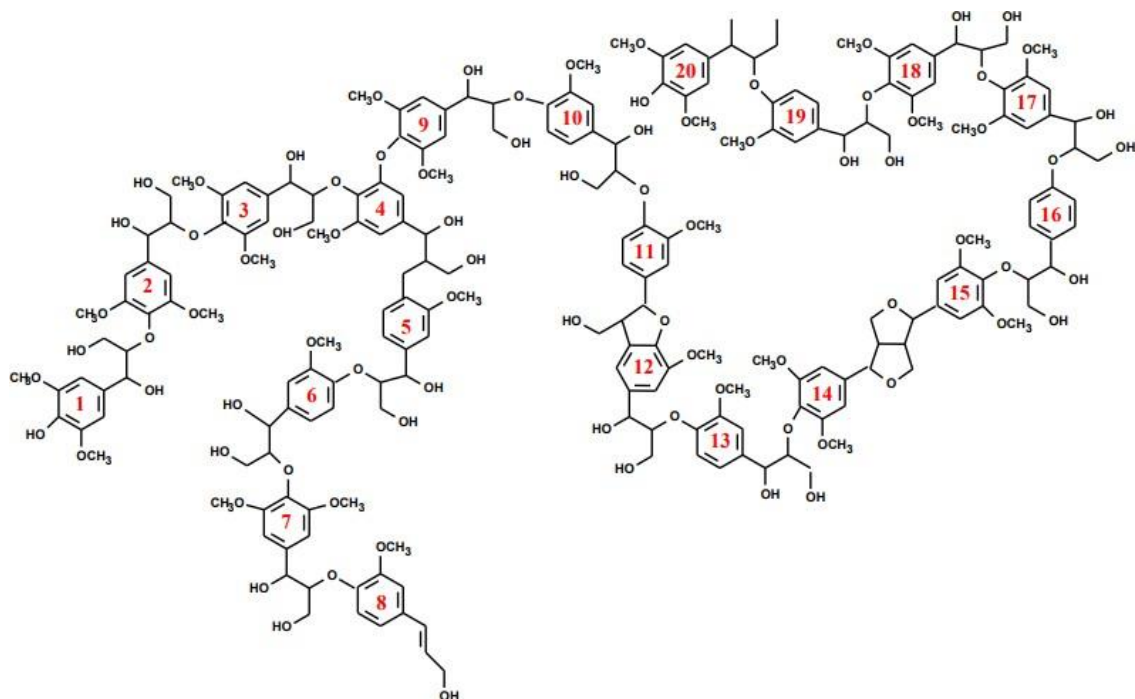
O licor negro gerado durante o processo de polpação na indústria de papel e celulose possui uma elevada quantidade de lignina, as denominadas ligninas Kraft, ao invés de serem queimadas essas ligninas podem ser recuperadas por meio de dois processos, a ultrafiltração e a precipitação ácida, que é a mais utilizada industrialmente (FOELKEL, 2012).

4.6.1 Lignina kraft

A lignina do processo Kraft (Figura 9) (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 molecular 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).

Figura 9: Estrutura da lignina Kraft de coníferas

Fonte: (MARTON, 1969)

Figura 10: Estrutura da lignina Kraft de folhosa

Fonte: Klock (2024)

De acordo com Afinko, 2018 a lignina celulósica vem se apresentando como uma das formas mais acessíveis de carbono renovável e uma grande

promissora para substituir fontes provenientes de recursos fósseis na obtenção de produtos de alto valor agregado. Dentre a diversa gama de produtos destaca-se: combustíveis, químicos de plataforma e polímeros.

Segundo Luong et al. (2012) existem muitos estudos relacionados com 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.

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

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.

No entanto, o que dificulta a utilização da lignina em adesivos, especificamente em adesivos fenólicos, é a sua baixa reatividade com o formaldeído (PIZZI e MITTAL, 2003), ocorrente devido a sua estrutura não ser equivalente ao fenol, sendo que o mesmo possui sítios livres no anel aromático nas posições orto e para grupo hidroxil (MANKAR et al., 2012).

4.7 PRODUÇÃO DE PAINÉIS UTILIZANDO ADESIVOS COM LIGNINA

Atualmente a maioria das resinas sintetizadas advém de compostos orgânicos do petróleo, as quais além de não serem de fontes renováveis são consideravelmente caras e apresentam riscos a saúde humana, pois proporcionam riscos de toxicidade. Neste contexto, alguns estudos vêm apresentando a vantagem de se inserir um composto orgânico, como a lignina, nos adesivos para madeira, pois é proveniente de fonte renovável e atualmente usada em processos de menor valor agregado.

Santos et al., (2015) a substituição total do fenol por lignina fenolada, foram realizados sete tratamentos com variação de percentual de lignina fenolada. Quando comparados os adesivos produzidos apresentaram características semelhantes ao adesivo comercial, com exceção da viscosidade. Para o teste dos adesivos, os autores

realizaram testes de cisalhamento para madeira seca e úmida, as quais apresentaram resultados satisfatórios.

Santos (2016), avaliou a inclusão da lignina Kraft na síntese de adesivos fenólicos para colagem de madeira, e verificou que a inserção da lignina nos adesivos não prejudicou as propriedades de adesão e de resistência mecânica.

Magalhães et al., (2019) desenvolveu um estudo onde produziu e caracterizou painéis de madeira compensada com resina fenol formaldeído com substituição de lignina Kraft fenolada, lignina tratada termicamente e lignina com dicromato de potássio. As resinas foram comparadas com o fenol formaldeído, considerada como controle, chegando a uma conclusão que a lignina Kraft é eficiente como substituta parcial em até 50% do fenol em adesivos fenol-formaldeído para a produção de painel de compensado.

Luckman et al., (2019) analisou o efeito da adição de lignina Kraft à resina ureia formaldeído comercial nas propriedades de painéis aglomerados. Obtendo como resultado que a adição da lignina independente de seu percentual prejudicou a estabilidade dimensional e as propriedades de resistência e rigidez dos painéis, concluindo ainda que a combinação entre a ureia formaldeído e a lignina, juntamente com as variáveis do processo não são recomendadas para atingir os parâmetros de qualidade.

Karthauser et al., 2023 abordou a substituição de 30% do fenol por lignina Kraft para a produção de painel de compensado de cinco camadas, com lâminas de pinheiro silvestre. Os resultados obtidos mostraram que a substituição de parte do fenol é promissora para a produção de painéis de madeira.

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.

5 METODOLOGIA

Nesta seção encontram-se apresentados a classificação da pesquisa, os materiais utilizados bem como os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

5.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Segundo a classificação de Silveira e Córdova (2009) o presente estudo está classificado como:

- Quanto à abordagem, trata-se de uma pesquisa qualitativo-quantitativa, pois os dados relacionados as propriedades físico-mecânicas dos painéis e as propriedades químicas do adesivo proposto são apresentadas de maneira quantitativa. Ao mesmo tempo os métodos de confecção do adesivo e dos painéis de madeira compensada caracterizam-se como qualitativas, bem como, as melhorias ambientais proporcionadas pela resina confeccionada.
- Quanto à natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada, pois gerou novos conhecimentos embasados em uma metodologia específica, aplicada em produto específico. Os conhecimentos obtidos podem ser aplicados em busca de solucionar os problemas de “linearidade” existente na indústria de painéis de madeira.
- Quanto aos objetivos, é uma pesquisa exploratória, pois, depois de aplicar a metodologia de produção do adesivo e dos painéis, ela evidencia a influência da inserção da lignina nos valores físicos e mecânicos dos painéis, além da melhoria ambiental proporcionada por esta inserção.
- Quanto aos procedimentos técnicos, trata-se de uma pesquisa experimental, pois realizou-se experimentos laboratoriais, de maneira a produzir os dados necessários da pesquisa.

5.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção estão descritos todos os procedimentos laboratoriais, assim como a metodologia empregada para o desenvolvimento dos ensaios físicos-mecânicos para a avaliação das propriedades dos painéis.

5.2.1 Materiais

5.2.1.1 Madeira

A madeira de reflorestamento *Pinus taeda* utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa foi doada pela empresa Miraluz, localizada no estado do Paraná. A madeira recebida já se encontrava desagregada em forma de lâminas com dimensão aproximada de 2 1500 mm x 1000 mm x 2 mm referindo-se a comprimento, largura e espessura (Figura 11), as quais foram seccionadas para obterem dimensão de lâminas menores na dimensão de 450x450 mm para se adequar os equipamentos laboratoriais.

Figura 11: Lâminas de Pinus comercial



Fonte: Elaborada pelo autor

5.2.1.2 Adesivo

O adesivo utilizado para a confecção da mistura foi o fenol-formaldeído produzido pela empresa química Hexion, doado pela indústria de painéis de madeira compensada Miraluz. O adesivo foi fornecido pela empresa em várias etapas do processo em diferentes proporções, a fim de garantir a vida útil do adesivo adequada para a fabricação dos painéis.

O fenol formaldeído é um adesivo termo fixo notoriamente empregado na produção de diversos tipos de painéis de madeira, devido a sua alta durabilidade, que proporciona aos painéis: alta adesão e excelentes resultados de resistência, que torna o painel estrutural dependendo de sua composição (FRIHART, 2013).

5.2.1.3 Fenol

Para a primeira etapa do desenvolvimento do trabalho onde realizou-se a fenolação da lignina, utilizou-se como solvente o fenol cristal PM: 94,11 da empresa Nox Laboratório de Solutions. O intuito da utilização do fenol cristal (Figura 12) nessa primeira etapa foi de obter uma mistura mais homogênea, já que o fenol-formaldeído já possui uma certa quantidade de fenol, ainda, sabe-se que a lignina é um material hidrofóbico e não dissolveria em mistura aquosa.

Figura 12: Fenol cristalizado utilizado no primeiro método do processo



Fonte: Elaborada pelo autor

5.2.1.4 Reagentes

Os reagentes empregados na confecção deste trabalho foram:

- Metanol (99,7%);
- Hidróxido de Sódio – NaOH (60%);
- Formaldeído (37%)

Todos os produtos citados acima foram obtidos da empresa Nox Solutions Industria de Produtos Químicos, Brasil.

5.2.1.5 Lignina kraft

A lignina Kraft industrial utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa foi doada por empresa produtora de polpa celulósica de madeira de Eucalipto spp. A

lignina em pó (Figura 13) comercializada com níveis de pureza de acima de 95%, foi aplicada em todas as etapas do trabalho, a fim de substituir parte da resina fenólica.

Figura 13: Lignina Kraft residual



Fonte: Elaborada pelo autor

5.2.2 Métodos

Após o recebimento dos materiais doados, iniciaram-se as etapas de mistura da lignina ao adesivo fenol-formaldeído, divididos em 3 diferentes métodos:

1º Método: Fenolação da Lignina + Fenol-formaldeído

2º Método: Mistura da Lignina + Fenol-formaldeído sob ação de tempo e temperatura.

3º Método: Síntese fenólica + Lignina

Os procedimentos de cada método estão descritos nas seções subsequentes. Para cada método realizou-se a substituição parcial de 10% e 20% de adesivo por lignina, porcentagens estas definidas após testes primordiais realizados com porcentagens inferiores a 10% e superiores a 20%, as quais não apresentaram o desempenho esperado, já que com porcentagens inferiores a 10% notou-se que havia a possibilidade de aumentar a quantidade de lignina, no entanto, porcentagens superiores a 20% apresentaram uma viscosidade muito elevada, não permitindo a total homogeneidade da mistura.

5.2.2.1 Método 1: Fenolação da lignina + adesivo fenol-formaldeído

Este método é marcado pela realização da fenolação da lignina ao fenol-formaldeído, onde 10% e 20% de material em pó (lignina) substituíram parte do adesivo comercial fenol-formaldeído, após a dissolução da lignina em fenol cristalino (Figura 14).

A gramatura de adesivo 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 de 450 mm x 450 mm, assim determinou-se que para cada linha de cola é necessário aproximadamente 73 g de adesivo, um total de 292 g por painel. Devido a possíveis perdas durante o processo, produziu-se 400 g da mistura para cada painel fabricado.

- **Substituição parcial do adesivo fenol-formaldeído em 10%:** Adicionou-se ao béquer 40g de lignina, 54g fenol e 306g de adesivo, totalizando 400 g de produto.
- **Substituição parcial do adesivo fenol-formaldeído em 20%:** Adicionou-se ao béquer 80g de lignina, 107g de fenol e 213g de adesivo

Figura 14: Materiais



Fonte: Elaborada pelo autor

Para a diluição da lignina, dilui-se o fenol cristalino em banho maria na temperatura de 60°C até o estado líquido e, gradativamente adicionou-se a lignina em pó. Essa mistura manteve-se aquecida em banho-maria por aproximadamente 1 hora a 60° C, com agitação magnética, até a diluição completa, obtendo-se um material colante homogeneizado fenolado (para ambos os casos se repetiu esse processo 3 vezes, para obter a quantidade necessária para a fabricação de 3 chapas de painel), como apresentado na Figura 15.

Figura 15: Preparo do adesivo



Fonte: Elaborada pelo autor

Passados 20 min de descanso desse material, partiu-se então para a fabricação de 3 painéis de madeira compensada de 5 lâminas, com gramatura de adesivo de 365 g/m².

5.2.2.2 Método 2: Mistura da lignina + Fenol-formaldeído sob ação de tempo e temperatura

Este método consiste na mistura da lignina ao adesivo fenol formaldeído pelo método de tempo e temperatura, onde 10% e 20% de material em pó (lignina) substituíram parte do adesivo comercial fenol-formaldeído

Para melhor diluição da lignina iniciou-se com a adição de 20g de água quente em 360g de adesivo fenol-formaldeído pré-aquecido em um béquer, com o intuito de torná-lo mais fluido, sendo essa mistura aquecida em banho-maria por 10 min antes da adição da lignina em pó.

Passado esse período de aquecimento adicionou-se 40g de lignina em pó, agregando aos poucos com auxílio de agitador magnético e bastão de vidro, finalizado toda a adição de lignina, manteve-se esse material a 60°C por 60 min até ficar uma mistura homogênea (Figura 16) a mistura, a mesma descansou por 20 min antes da fabricação do painel de madeira compensada. Repetiu-se os mesmos processos para a substituição de 20% de adesivo fenol formaldeído por 20% de lignina, para este caso utilizou-se 80g de lignina, 40 g de água quente e 280 g de fenol formaldeído.

Com a quantidade de adesivo comercial + lignina produzido, fabricou-se 3 chapas de painel compensado de 5 camadas, para cada porcentagem de substituição de adesivo comercial.

Figura 16: Preparação da Mistura



Fonte: Elaborada pelo autor

5.2.2.3 Método 3: Síntese da resina fenólica

A resina de fenol formaldeído (PF) foi confeccionada por meio da reação de fenol (P) e formaldeído (F) em razão molar 1:2. Uma solução aquosa de NaOH a 50% foi usada como catalisador e solução aquosa de metanol a 50% como solvente.

A síntese foi preparada em um reator equipado com agitador, termômetro e um condensador de refluxo (Figura 17). Estudos conduzidos por Kamarudin et al., (2020); Khan et al., (2004) foram usados como referência para as iniciais das razões molares e das condições de síntese. Os reagentes: 50,0 g de fenol (99,5%), 90,0 g de formaldeído a 37%, 20,0 g de solução aquosa de metanol a 50% foram colocados no interior do reator e submetidos a agitação de 200 rpm usando um agitador mecânico e aquecimento a 80° C por 2 horas. Foram adicionadas três cargas de 2.4 g de NaOH, sendo a primeira no início e as outras a 10 e 20 minutos.

Figura 17: Reator para confecção do adesivo



Fonte: Elaborada pelo autor

5.2.2.4 Síntese da resina fenólica com lignina

Devido à baixa reatividade da lignina com o formaldeído foi necessário realizar a fenolação. O intuito da utilização dessa metodologia foi de aumentar a reatividade e propiciar/facilitar a reação de síntese e polimerização do adesivo. Em um frasco provido de tampa foi colocado a lignina e fenol (p.a.), em quantidades (em massa) para uma proporção de 10 e 20 % de lignina. A mistura lignina-fenol foi levada a banho-maria a uma temperatura de 40° C por 1 hora, para a obtenção de uma massa homogênea (lignina fenolada).

Na tabela 1 estão dispostas as quantidades de lignina, fenol e formaldeído utilizados nas diferentes formulações de resinas LPF. A substituição parcial da massa de fenol por lignina variou de 10% (LPF10) e 20% (LPF20).

Tabela 1: Quantidade dos reagentes utilizados nas sínteses das resinas LPF

Resina	Lignina (g)	Fenol (g)	Formaldeído (g)
PF	0	50	90
LPF 10	5	45	90
LPF 20	10	40	90

Fonte: Elaborada pelo autor

A condição e o equipamento de síntese da resina LPF foram semelhantes à resina PF. O fenol modificado por fenolação, o formaldeído e metanol foram submetidos a aquecimento até 80° C e mantidos a essa temperatura por 2 horas após a adição palatina de hidróxido de sódio (50%). A quantidade de metanol e hidróxido de sódio foi a mesma usada (20g; 50% v/v) e (7,2g; 60%). A Figura 18 ilustra o adesivo depois de fabricado.

Figura 18: Adesivos síntese da resina fenólica com a lignina

Fonte: Elaborada pelo autor

5.3 CARACTERIZAÇÃO DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DAS MISTURAS

A caracterização da degradação térmica da matéria-prima (misturas de adesivo com lignina) utilizada na produção dos painéis de madeira compensada, foi efetuada no Laboratório de Química Experimental do Instituto de Ciências e Engenharias do Campus de Itapeva. Esta análise permitiu a avaliação da cinética de degradação térmica dos materiais utilizados através de técnicas de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TGA) com o intuito de, através dos resultados obtidos, propor parâmetros adequados com relação a faixa de temperatura de trabalho ideal e tempo de processamento nas etapas de prensagem termo ativada e temperatura de degradação das misturas. Primeiramente foi realizada a TGA,

visando determinar a variação da massa dos materiais das misturas, enquanto estes foram submetidos a uma programação controlada de temperatura. Como condições experimentais abordou-se atmosfera inerte de nitrogênio com fluxo de gás de 20 mL/min e taxa de aquecimento de 16°C/min com faixa de temperatura entre 30 e 900°C.

5.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO ADESIVO

Nesta seção estão descritas as caracterização físico-química dos adesivos produzidos, neste estudo foi realizado uma única amostragem de cada ensaio, pela dificuldade em alocar o adesivo nos instrumentos.

5.4.1 Gel time

Foram utilizados 5 (cinco) gramas de cada adesivo para a determinação do tempo de gelatinização (gel time). O adesivo foi colocado em um tubo de ensaio e imerso em glicerina à temperatura de 130° C, ficando sob constante movimentação por meio de uma haste de vidro até que a resistência do adesivo atingisse a fase de gel (Figura 19). O tempo decorrido até a fase de gel foi anotado, e corresponde ao valor de gel time.

Figura 19: Estrutura Gel time



Fonte: Elaborada pelo autor

5.4.2 Teor de sólidos

O teor de sólidos foi determinado de acordo com a norma ASTM standard D4426– 01(2006). As amostras utilizadas continham 1 g de adesivo, que foram colocados em cadinhos de alumínio e levados a estufa, à 103±2° C, até atingirem massa constante. O teor de sólidos percentual foi calculado pela razão entre a massa final e a inicial.

5.4.3 Viscosidade

A determinação da viscosidade foi obtida de acordo com a norma ASTM D1200- 2005 (Standard Test Method for Viscosity by Ford Viscosity Cup), onde utilizou-se o copo Ford com orifício de 4 mm.

5.4.4 pH

O pH dos adesivos foi obtido por mensuração direta. O pHmetro utilizado foi o Digimed DM22.

5.5 PRODUÇÃO DE PAINÉIS COMPENSADO

A confecção dos painéis de compensado foi realizada no Laboratório de Painéis do Instituto de Ciência e Engenharia da UNESP de Itapeva.

5.5.1 Classificação das lâminas

As lâminas em tamanho comercial (2x1000x1500 mm) recebidas da empresa Miraluz, foram fracionadas em lâminas de 450x450 mm. Posteriormente ao seccionamento, as lâminas foram submetidas ao teste de classificação visual segundo o documento normativo ABNT NBR ISO 2426-3: 2006. O documento especifica que as lâminas devem estar dentro de 5 categorias diferentes, sendo:

- Classe 1: isentas de qualquer defeito visível,
- Classe 2: com pequenos defeitos visuais, e assim sucessivamente.

As lâminas de qualidade mais inferiores classificadas como 5, não foram utilizadas neste trabalho (Figura 20), sendo utilizada até a classe 4. 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.

Figura 20: Classificação visual das lâminas



Fonte: Elaborada pelo autor

5.5.2 Confecção dos painéis

Inicialmente as lâminas foram secas em estufa (Figura 21) em temperatura de 103 ± 2 °C por 24 h, atingindo umidade de aproximadamente 5%, umidade ideal para confecção deste tipo de painel.

Figura 21: Lâminas na estufa



Fonte: Elaborada pelo autor

Após a secagem das lâminas, as mesmas foram deixadas em temperatura ambiente até seu resfriamento. Enquanto isso, iniciou-se a pesagem dos adesivos em

uma balança semi- analítica, sendo que para cada linha de cola utilizou-se a gramatura de 395 g/m² conforme procedimento adotado por Ferreira (2017), sendo para cada linha de cola adotada a proporção de 80g de adesivo e 8 g de água (Método 1).

O Quadro 1 indica os tratamentos realizados para a caracterização físico-mecânica dos painéis do presente estudo.

Quadro 1: Tratamento estudados para os diferentes métodos de incorporação de lignina ao adesivo fenol-formaldeído

TRATAMENTO	ETAPA	COMPOSIÇÃO DO ADESIVO
T1	Referência	Compensado com FF comercial
T2	Método 1	Compensado com FF comercial + fenolação + 10% lignina
T3	Método 1	Compensado com FF comercial + fenolação + 20% lignina
T4	Método 2	Compensado com FF comercial + mistura 10% lignina
T5	Método 2	Compensado com FF comercial + mistura 20% lignina
T6	Método 3	Compensado com síntese de FF + 10% lignina
T7	Método 3	Compensado com síntese de FF + 20% lignina

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a pesagem em separado da composição adesivo e lignina para cada linha de cola, foi realizada a aplicação nas lâminas (Figura 22).

Figura 22: Aplicação do adesivo nas lâminas



Fonte: Elaborada pelo autor

Logo após a aplicação do adesivo nas lâminas, as mesmas foram levadas a pré-prensa sem temperatura, visando a melhor distribuição do adesivo entre as lâminas com pressão de aproximadamente 2 kgf/cm² por 5 minutos (Figura 23).

Figura 23: Pré prensagem do painel já confeccionado



Fonte: Elaborada pelo autor

Finalizada a pré-prensagem, o painel foi direcionado para a prensagem a quente com pressão aplicada de 6 kgf/cm² (aproximadamente 0,6 MPa), 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 24). Os parâmetros de fabricação também foram baseados no estudo de Ferreira (2017).

Figura 24: Prensagem a quente utilizada



Fonte: Elaborada pelo autor

Após a etapa de prensagem, os painéis (Figura 25) seguiram para a etapa de resfriamento em temperatura ambiente por aproximadamente 48 horas. Passado esse período, 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 25: Painéis de madeira compensada com lignina



Fonte: Elaborada pelo autor

5.6 CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS

Para a caracterização físico-mecânicas dos painéis confeccionados, adotou-se as diretrizes de documentos normativos brasileiros como ponto de referência para a realização dos procedimentos. As normas utilizadas estão descritas no Quadro 2.

Quadro 2: Documentos Normativos

Ensaio	Tipo	Norma
Densidade	Físico	ABNT NBR 9485:2011
Teor de Umidade	Físico	ABNT NBR 9484:2011
Inchamento em espessura	Físico	ABNT NBR 9535:2011
Módulo de Elasticidade	Mecânico	ABNT NBR 9533:2012
Módulo de Ruptura	Mecânico	ABNT NBR 9533:2012
Cisalhamento na linha de cola	Mecânico	ABNT NBR ISO 12466-1:2012

Fonte: Elaborada pelo autor

5.6.1 Densidade

Para a realização da avaliação da densidade foram retirados 6 corpos de prova (cps) dos painéis produzidos para cada etapa, conforme especificação normativa, nas dimensões de 100 x 50 x 13 mm. Na sequência determinou-se 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 (largura, comprimento e espessura) de cada corpo de prova. Para o procedimento de medição do comprimento e largura, adotou-se como equipamento de medição 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 aplicou-se na Equação 1.

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

Onde:

ρ : Massa específica (g/cm³);

m: Massa dos corpos de prova (g); c: comprimento (cm);

l: largura (cm);

e: espessura (cm).

5.6.2 Teor de Umidade

O ensaio de teor de umidade foi baseado na norma ABNT NBR 9484: 2011. Para esse teste foram utilizados os mesmos corpos de prova do ensaio de densidade, em total de 7 corpos de prova por etapa (Figura 26).

Figura 26: Corpos de prova utilizados



Fonte: Elaborada pelo autor

Primeiramente todos os corpos de prova foram pesados numa balança digital com precisão de 0,01g para obtenção da massa úmida (μm), e então levados à estufa laboratorial com temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, permanecendo por 24 horas, quando atingiram massa constante (m_s). Após a coleta dos dados, os mesmos foram aplicados na Equação 2, para a obtenção do teor de umidade de cada corpo de prova.

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

Onde:

TU: Teor de umidade (%);

μm : massa úmida (g);

m_s : massa seca (g).

5.6.3 Inchamento em espessura

O ensaio de inchamento foi realizado conforme o documento normativo ABNT NBR 9535:2011. Foram confeccionados 6 corpos de prova por Etapa, na dimensão de 60 x 10 mm, sendo a dimensão de comprimento perpendicular às fibras (Figura 27).

Figura 27: Corpos de prova de inchamento



Fonte: Elaborada pelo autor

Os corpos de prova foram divididos em duas séries de três, sendo uma série de controle conforme especificação normativa. Para isso, realizou-se 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 aplicado nas Equações 3, 4 e 5, respectivamente.

$$R = \frac{(e1 \times e5)}{e2 \times e3} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

R: recuperação em espessura (%);

e1 : é a soma das espessuras iniciais dos corpos de prova de controle (mm);

e2: é a soma das espessuras dos corpos de prova utilizados como controle secos em estufa (mm);

e3: é a soma das espessuras iniciais dos corpos de prova antes a imersão dos corpos de prova (mm);

e5: é a soma das espessuras dos corpos de prova após a imersão em água (mm).

$$IR = \left(\frac{e1 \times e4}{e2 \times e3} - 1 \right) \times 100 \quad (4)$$

Onde:

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

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

Onde:

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

5.6.4 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 por meio 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 do Instituto de Ciência e Engenharia de Itapeva - Unesp. De acordo com a Figura 28.

Figura 28: Ensaio de flexão realizada na EMIC



Fonte: Elaborada pelo autor

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

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

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);

$F2 - F1$: é o incremento de carga no trecho reto da curva-deformação, sendo **$F2$** relativa à carga de ruptura de 40% (N);

$S2 - S1$: é o incremento de deflexão no ponto central do vão (mm).

5.6.5 Cisalhamento na 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 uma das Etapas, 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 29, apresenta um exemplo de corpo de prova utilizado.

Figura 29: Corpos de prova ensaio de cisalhamento



Fonte: Elaborada pelo autor

O ensaio foi realizado na máquina universal de ensaios EMIC, do Laboratório de Propriedades dos Materiais da UNESP – Itapeva, seguindo todas as instruções descrita na norma (Figura 30).

Figura 30: Ensaio de cisalhamento na linha de cola



Fonte: Elaborada pelo autor

5.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Por fim, com todos os dados dos ensaios evidenciados, aplicou-se a análise estatística ANOVA com nível de significância de 5%, e o teste de Tukey, visando a comparação entre as médias das Etapas. Para evidenciar a diferença existente entre as Etapas, utilizou-se as letras para comparação das médias pelo teste de Tukey, onde letras iguais demonstram que não houve diferença estatística e letras diferentes que houve diferença. O software utilizado foi o R versão 3.4.2 de 2017.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção estão apresentados os dados obtidos após a realização da caracterização dos adesivos bem como a caracterização físico-mecânica dos painéis de compensado produzidos nas três etapas.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ADESIVOS

Na Tabela 2 estão apresentados os dados referentes as propriedades das resinas.

Tabela 2: Valores obtidos na caracterização das resinas

Tratamento	pH	Teor de sólidos	Viscosidade (cP)	Gel time (s)	Método
T1	12,56	51	703,25	340	Referência
T2	10,80	66	628,18	310	Método 1
T3	11,52	66	608,16	285	Método 1
T4	**	73	*	Não formou gel	Método 2
T5	**	74	*	Não formou gel	Método 2
T6	10,70	46,35	101	219	Método 3
T7	11,28	49,6	211	354	Método 3

Fonte: Elaborada pelo autor

*Devido a excessiva viscosidade o adesivo não teve fluidez

** Devido a alta viscosidade do adesivo não foi possível determinar o pH

Pela Tabela 1 o valor de viscosidade do T2 e T3 condiz com os dados das formulações que variam de 600 a 800 cP (PIZZI e MITTAL, 2003). Já para os tratamentos T4 e T5 não foi possível fazer o cálculo de viscosidade, pois a cada aumento de lignina o adesivo se tornava mais viscoso, não apresentando fluidez para passar pelo orifício do copo. O aumento da viscosidade do adesivo comercial FF pela adição de lignina está associado a efeitos físicos, como o aumento do teor de sólidos, e motivos químicos, como diferenças nos pesos moleculares da lignina, suas ramificações e locais reativos disponíveis (GHORBANI et al., 2012).

Já o T6 e T7 apresentaram uma fluidez bem grande, ficando com valores bem distantes ao especificado para a resina comercial, a qual, também dificultou a aplicação nas lâminas.

Comparando os tratamentos T6 e T7 com o estudo desenvolvido por Santos (2016), os dados de viscosidade são semelhantes (123 e 150 cP), porém Santos (2016) explica que essa baixa viscosidade pode ser justificada pela baixa reatividade entre a lignina e o formaldeído, também pela presença de metanol em sua formulação, o qual diminui a velocidade de síntese adesiva.

Analisando a propriedade de teor de sólido, observamos que os Tratamentos T4 e T5 apresentaram valores superiores aos demais, até mesmo da referência, podendo ser justificado por ter sido produzido apenas com a resina comercial e lignina sem nenhuma adição de outra substância química. Comparando os valores de teor de sólidos obtidos neste estudo com o de Dias, 2014, independentemente do método utilizado ou porcentagem de lignina empregada, nota-se que os dados obtidos foram maiores. Ainda comparando os dados entre os tratamentos, nota-se que o tratamento T6 e T7 apresentaram valores inferiores aos demais, o que pode ser justificado pela baixa reatividade da lignina com o formaldeído, ocorrendo a evaporação do formaldeído não reagido e da água formada.

Observa-se que o pH encontrado neste estudo nos tratamentos que foram possíveis identificar, ficaram entre a faixa determinada por Marra (1992), que diz que os valores de pH para adesivos fenólicos para colagem de madeira variam entre 9 a 12%. Ainda, os valores encontrados neste estudo foram semelhantes aos encontrados por Dias, 2014 e Santos et al., 2016.

Nota-se que para todos os tratamentos com lignina na composição o valor de gel time se apresentou menor quando comparado com a referência, segundo Dias 2014, isso pode ser explicado pelo menor tempo de polimerização dos adesivos com lignina.

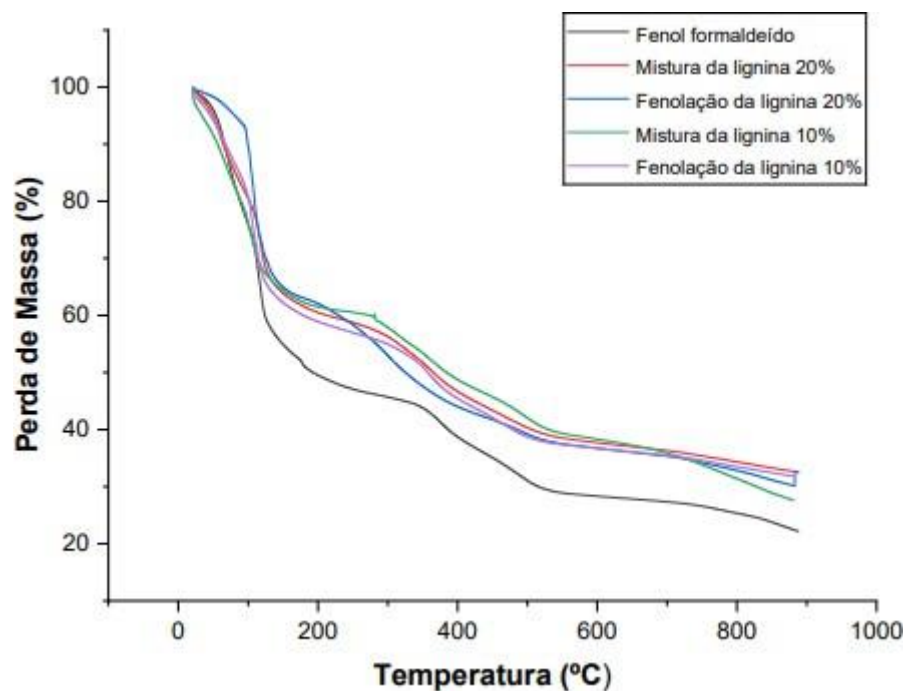
Dentre os tratamentos, o T6 apresentou um tempo de gelatinização menor que os demais, podendo ser justificado por apresentar um teor de sólidos inferior aos outros tratamentos. Para os tratamentos T4 e T5 não foi possível obter o tempo de gelatinização devido a sua alta viscosidade, não possibilitando a inserção no tubo de ensaio. Solt et al. (2018) explica que quando comparados com polímeros sintéticos, as resinas com ligninas têm um tempo de gel mais longo que pode ser atribuído a um menor valor de formaldeído livre.

6.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

Os resultados TGA das resinas são apresentados na Figura 31.

Observa-se que as resina comercial apresentou ser menos estável tanto nos estágios iniciais bem como nos finais, quando comparado com os adesivos com adição de lignina. Os adesivos com adição de lignina independente do método utilizado para a mistura apresentaram perda de massa semelhante.

Figura 31: Diagramas da análise calorimétrica para os tratamentos



Fonte: Elaborada pelo autor

Nota-se que a resina comercial apresentou menor estabilidade e um padrão diferente de decomposição, o que não era esperado, visto que, essa não é a temperatura de cura da resina fenol formaldeído. A perda crescente massa era esperada para as demais resinas já que a mesma estaria relacionada à quebra das cadeias laterais da lignina e as perdas decorrentes de reações pós-cura da resina ocorridas entre 120-240° (KHAN et al., 2004). Após 600° observa-se que todas as resinas passaram a se decompor mais lentamente, ainda depois Acima dos 600° C poucas diferenças entre as resinas são observadas isso porque nesta faixa

começaram a se degradar as estruturas aromáticas presente em todas as amostras levando a formação de um resíduo de carvão (COSTES et al., 2017).

6.3 PROPRIEDADES FÍSICAS

6.3.1 Densidade

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos no ensaio físico de densidade para os três métodos abordados neste trabalho.

Tabela 3: Valores médios de Densidade e desvio padrão para todos os tratamentos estudados.

Tratamento	Densidade (Kg/m ³)	Método
T1	555 (0,05) A	Referência
T2	566 (0,03) A	Método 1
T3	582 (0,02) A	Método 1
T4	569 (0,02) B	Método 2
T5	634 (0,03) A	Método 2
T6	603 (0,05) A	Método 3
T7	606 (0,05) A	Método 3

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $\alpha = 5\%$)

Fonte: Elaborada pelo autor

Pela Tabela 3, com relação à densidade para o Método 1 não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre as porcentagens de lignina, porém numericamente ocorre o aumento da densidade quando se aumenta a proporção da lignina.

Em análise ao Método 2 em que se utilizou o método de tempo e temperatura nota-se que não houve diferença estatística entre 0% e 10% de lignina e houve diferença estatística entre 0% e 20% e 10% e 20% de lignina, além de notarmos uma diferença numérica entre as três porcentagens, visto que, quando se aumenta a quantidade de lignina, tem-se o aumento da densidade.

Para o Método 3, pode se notar que não houve diferença estatística entre as porcentagens de lignina, porém do mesmo modo das etapas anteriores, a medida de que se aumenta a substituição do adesivo pela lignina, tem-se o aumento da densidade do painel.

Os resultados obtidos permitem observar que as médias obtidas para todos os tratamentos estão muito próximas ao valor obtido no estudo realizado por Karri et al. (2022) que estudaram painéis compensados produzidos com lâminas de poplar wood e resina fenol- formaldeído com adição de lignina.

Comparado com os dados de densidade obtidos no presente estudo aos valores propostos no catálogo da ABIMCI de 532 Kg/m³, nota-se que os painéis desta pesquisa apresentaram valores próximos de densidade para todos os tratamentos estudados. É possível observar que os valores obtidos para as densidades embora apresentem pequena variação permite classificar os painéis como média densidade. Segundo Panel Guide (2014) produzido pela BM Trada a densidade de painéis de madeira compensada indicados para uso na construção civil devem estar entre 400 e 700 kg/m³. Sendo assim, todos os painéis produzidos nesse estudo independentemente do método de preparação do adesivo se enquadram nessa aplicação.

6.3.2 Teor de Umidade

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados referentes ao teor de umidade obtido para cada método estudado.

Tabela 4: Valores médios de Teor de Umidade e desvio padrão para todos os tratamentos estudados

Tratamento	Teor de Umidade (%)	Método
T1	11,7 (0,46) B	Referência
T2 (10%)	9,62 (0,54) A	Método 1
T3 (20%)	9,82 (0,18) A	Método 1
T4 (10%)	11,9 (0,62) B	Método 2
T5 (20%)	9,88 (0,55) A	Método 2
T6 (10%)	6,69 (0,2) A	Método 3
T7 (20%)	5,79 (0,34) A	Método 3

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $\alpha = 5\%$)

Fonte: Elaborada pelo autor

Pela Tabela 4, nota-se que o painel sem adição de lignina em comparação ao primeiro método diferiu significativamente em relação aos adesivos com a inserção de lignina. Já para o segundo método, onde as variantes são tempo e temperatura, o teor de umidade teve diferença significativa entre os painéis produzidos com adesivos com adição de lignina de 10% e 20%. Para o terceiro método, pode-se observar que ocorre diferença entre as porcentagens de 0 e 10% e entre 0 e 20%.

Os resultados obtidos, independente do método analisado indica uma tendência de redução do teor de umidade dos painéis com a adição de lignina. Isso comprova o que já havia sido observado no estudo realizado por Karri et al., (2022). Os autores observaram que incorporação da lignina no adesivo fenol-formaldeído reduziu o teor de umidade dos painéis. Os autores observaram redução de aproximadamente 25% no teor de umidade dos painéis em comparação ao adesivo apenas fenol-formaldeído. No presente estudo, observou-se redução de até 45% do teor de umidade dos painéis com a incorporação de lignina.

Tais resultados comprovam o que diversos estudos já observaram quanto ao aumento da estabilidade dimensional dos painéis com a incorporação da lignina em resina fenol- formaldeído (KARTHÄUSER, et al., 2024; HAMED YOUNESI-KORDKHEILI e ANTONIO PIZZI 2017).

Ainda pela Tabela 4, pode-se observar uma tendência de redução do teor de umidade dos painéis com a incorporação de lignina ao adesivo fenol-formaldeído, independente do método considerado. Ressalta-se que o melhor desempenho foi observado para o adesivo sintetizado em laboratório.

Como é possível observar, especialmente a resina sintetizada com adição de 10 e 20% de lignina kraft apresentaram resultados muito melhores. Isso pode ser justificado pelo processo de produção da resina permitir ligações mais fortes entre o adesivo a lignina, além do fato da lignina kraft apresentar propriedade hidrofóbica por apresentar menor teor de sais em sua composição conforme observado por Pia Solt et al.,2019.

6.3.3 Inchamento em espessura

Na Tabela 5 estão dispostos os dados obtidos nos ensaios de inchamento em espessura para os três métodos estudados. 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 5: Valores médios de inchamento

Tratamento	Inchamento (mm)	Método
T1	4,32	Referência
T2 (10%)	5,40	Método 1
T3 (20%)	5,53	Método 1
T4 (10%)	4,49	Método 2
T5 (20%)	4,41	Método 2
T6 (10%)	5,96	Método 3
T7 (20%)	6,7	Método 3

Fonte: Elaborada pelo autor

Ainda pela Tabela 5 é possível observar que os painéis sem adição de lignina foram os que apresentaram melhores resultados de inchamento. Considerando os três métodos estudados, nota-se que o 2º Método apresentou melhores resultados em todas as porcentagens de adição de lignina. Os demais métodos com resultados menos satisfatório, podem ser explicados pelo fato de os corpos de prova sofrerem delaminação, ou seja, abrirem durante a imersão (Figura 32), isso pode ter ocorrido devido à baixa qualidade das lâminas utilizadas, ou ainda pela influência das propriedades do adesivo como elevada viscosidade para o 1º Método provocando linha de cola não ancorada como descreve Iwakiri (2005) e, também, para o 3º Método provocando linha de cola faminta ocasionado pela excessiva fluidez do adesivo, ou seja, viscosidade mais baixa.

O aumento do inchamento após imersão em água por 24 horas em painéis com incorporação de lignina já havia sido observado por Hamed Younesi-Kordkheili e Antonio Pizzi (2018), onde a adição de 20% de lignina ocasionou um aumento de até 60% no inchamento. Segundo os mesmos autores esse aumento pode estar relacionado à diferença nas ligações formadas nas resinas lignina-fenol-formaldeído e fenol-formaldeído durante a síntese e à presença de grupos de ácido sulfônico muito sensíveis à água e que absorvem água na lignina.

Figura 32: Delaminação do corpo de prova

Fonte: Elaborada pelo autor

6.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

6.4.1 Módulos de ruptura (MOR) e Módulo de elasticidade (MOE) paralelo

Na Tabela 6 estão dispostos os dados referentes ao módulo de elasticidade obtidos para cada porcentagem de adição de lignina.

Tabela 6: Valores médios de módulo de elasticidade Paralelo e desvio padrão para todos os tratamentos estudados

Tratamento	MOE (MPa)	Método
T1	3749 (776,1) A	Referência
T2 (10%)	4053 (1115) A	Método 1
T3 (20%)	3467 (2179) B	Método 1
T4 (10%)	6306 (3714,59) AB	Método 2
T5 (20%)	8556 (863,13) A	Método 2
T6 (10%)	2372 (1314) B	Método 3
T7 (20%)	4266 (1213) A	Método 3

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si
(Tukey, $\alpha = 5\%$)

Fonte: Elaborada pelo autor

Considerando os MOE-PA obtidos no Método 1 nota-se que numericamente, que com a adição de 10% de lignina os painéis apresentam uma maior média (4053 Mpa) comparado com as demais Métodos, porém o mesmo não

difere estatisticamente quando não há a adição de lignina, porém diferem estatisticamente quando se adiciona uma porcentagem maior de lignina.

No segundo Método é possível observar que numericamente quanto mais lignina é adicionada ao processo tem-se o aumento gradativo do MOE. Estatisticamente falando, os dados de MOE obtidos com adição de 10% de lignina não diferem estatisticamente quando se adiciona 20% de lignina, porém ambos diferem quando não ocorre a adição de lignina.

Para a propriedade MOE-PA no Método 2 observamos que numericamente a adição de 20% de lignina apresentou uma média maior de MOE-PA (8556 MPA) em relação as demais, porém estatisticamente essa média não difere dos dados obtidos em 10% e 0% de adição de lignina.

Os dados de MOE obtidos neste estudo foram superiores aos de Silva et al., (2017), Santos, (2014), diferendo apenas o Tratamento 6 que apresentou valor inferior. Magalhães et., al (2019) desenvolveu um estudo semelhante, utilizando como método a síntese da resina com adição de lignina, obtendo dados de MOE bem menores quando comparados com os tratamentos deste estudo. Porém quando comparamos com o estudo de Karri et al, (2022) o MOE de todos os tratamentos foi menor.

Tabela 7: Valores médios de Módulo de ruptura Paralelo e desvio padrão para todos os tratamentos estudados.

Tratamento	MOR (MPa)	Método
T1	31,31(11,69) A	Referência
T2 (10%)	31,39 (18,09) A	Método 1
T3 (20%)	23,76 (17,48) A	Método 1
T4 (10%)	42,24 (19,90) A	Método 2
T5 (20%)	56,76 (56,74) A	Método 2
T6 (10%)	36,85 (15,73) A	Método 3
T7 (20%)	33,1 (16,50) A	Método 3

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $\alpha = 5\%$)

Fonte: Elaborada pelo autor

Para o MOR-PA no primeiro Método é possível observar que a adição de lignina não possui influência significativa entre os dados, sendo que os três métodos não diferem estatisticamente entre si.

Como observou-se no primeiro método, a adição de lignina ao adesivo não ocasionou influência significativa entre os dados. No entanto, numericamente analisando quanto maior a substituição do adesivo por lignina, maior o MOR-PA encontrado.

Os dados obtidos no terceiro Método não apresentam diferença estatística entre si, porém quando ocorre a substituição de parte do adesivo por 10% de lignina, nota-se que numericamente a média encontrada é maior (36,85 Mpa).

No estudo desenvolvido por Karri et al, (2022) os dados de MOR foram bem superior ao do presente estudo, podendo ser explicado pelo reforço de fibras de cânhamo empregado no compensado de choupo. Já quando comparado com os dados de Magalhães et al, (2019) notamos uma proximidade nos valores. O estudo de Silva et al, 2017 obteve resultados bem inferiores ao do presente estudo.

6.4.2 Módulo de ruptura (MOR) e módulo de Elasticidade (MOE) perpendicular

A Tabela 8 apresentam os dados de Módulo de elasticidade perpendicular obtido em cada Método.

Tabela 8: Valores médios de Módulos de elasticidade – PE e desvio padrão para todos os tratamentos estudados.

Tratamento	MOE -PE (MPa)	Método
T1	1415 (570,7) AB	Referência
T2 (10%)	1647 (410) A	Método 1
T3 (20%)	1574 (417,7) A	Método 1
T4 (10%)	2616 (862,17) A	Método 2
T5 (20%)	1213 (64,13) B	Método 2
T6 (10%)	1754 (356,2) A	Método 3
T7 (20%)	1333 (245,3) B	Método 3

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si
(Tukey, $\alpha = 5\%$)

Fonte: Elaborada pelo autor

Analisando cada um dos métodos é possível observar que numericamente, nas três metodologias a substituição parcial de 10% do adesivo por lignina apresentou uma média maior em todos os casos. Estatisticamente, no primeiro método observou-se que em 10% e 20% não houve diferença estatística entre os dados, porém em relação ao valor obtido sem lignina houve diferença estatística. No segundo método não ocorreu variação significativa entre a referência e 10% e referência e 20%, no entanto, houve diferença estatística entre 10%-20%. No terceiro método notamos uma semelhança entre o ocorrido no segundo, porém vemos que a referência e 10% e referência e 20% não diferem entre si, porém 10% e 20% diferem. Os dados dos tratamentos de MOE-PE deste estudo foram superiores aos encontrados por Magalhães et al, (2019) em todas as porcentagens de lignina.

Tabela 9: Valores médios de Módulos de ruptura – PE e desvio padrão para todos os tratamentos estudados

Tratamento	MOR-PE	Método
T1	23,07 (16,42) A	Referência
T2 (10%)	23,89 (11) A	Método 1
T3 (20%)	20,82 (10,81) A	Método 1
T4 (10%)	28,72 (7,31) A	Método 2
T5 (20%)	12,69 (2,02) B	Método 2
T6 (10%)	17,69 (3,45) A	Método 3
T7 (20%)	14,81 (2,1)A	Método 3

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si
(Tukey, $\alpha = 5\%$)

Fonte: Elaborada pelo autor

Observa-se que o MOR-PE da primeira Etapa não identificamos interação significativa entre os dados obtidos para cada porcentagem. Porém numericamente analisando vemos que a média em 10% (23,89 MPa) manteve-se maior em relação as demais.

Para a segunda Etapa nota-se que MOR-PE apresentou diferença estatística entre 0-20% e entre 10% e 20%, porém não houve diferença entre 0% e

10%. Numericamente verificou-se a mesma situação da primeira Etapa, onde o MOR-PE em 10% apresentou média maior em relação a 0% e 20%.

Na terceira Etapa não ocorreu diferença estatística entre os dados de MOR-PE encontrados, contudo, numericamente vemos que a não substituição parcial de lignina apresentou uma maior média (23,07 Mpa), em relação aos demais casos. Os dados dos tratamentos de MOR-PE deste estudo foram superiores aos encontrados por Magalhães et al, (2019) em todas as porcentagens de lignina, podendo ser explicado pelo fato de um compensado apresentar um maior número de camadas, permite maior uniformidade de resistência e rigidez, ao longo do comprimento (direção paralela) e largura (direção perpendicular), uma vez que durante o ensaio de flexão ocorre uma melhor distribuição das tensões que se desenvolvem durante o carregamento (TSOUMIS 1991).

6.4.3 Qualidade de colagem – resistência ao cisalhamento (Tv)

Na Tabela 10 estão dispostos os dados do teste de qualidade de colagem verificado a partir do cisalhamento na linha de cola para cada método estudado com a incorporação da lignina Kraft.

Tabela 10: Valores médios Cisalhamento e desvio padrão para todos os tratamentos estudados.

Tratamento	Tv (MPa)	Método
T1	2,41(0,60) A	Referência
T2 (10%)	1,39 (0,64) A	Método 1
T3 (20%)	1,15(0,55) A	Método 1
T4 (10%)	1,82 (0,40) A	Método 2
T5 (20%)	1,75 (0,33) B	Método 2
T6 (10%)	1,48 (0,21) B	Método 3
T7 (20%)	1,36 (0,3) B	Método 3

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $\alpha = 5\%$)

Fonte: Elaborada pelo autor

Analisando o Método 1 é possível verificar que não houve diferença estatística entre a referência em nenhuma porcentagem de lignina, porém numericamente, quando não houve a substituição parcial do adesivo, a média se apresentou maior em relação as substituições.

Avaliando o Método 2, observa-se que não ocorre a mesma situação do 1º Método, onde nota-se a diferença estatística entre a referência e 20%, contudo, numericamente a não adição de lignina apresentou uma média maior em relação aos outros dados.

Já para 3º Método é possível observar que houve diferença estatística entre 0-10% e entre 0-20%, não ocorrendo variação entre 10%-20%. Numericamente a substituição parcial do adesivo pela lignina não foi eficaz, sendo que a maior média obtida foi sem lignina.

Embora os resultados obtidos para os três métodos indiquem uma redução da qualidade de colagem com a incorporação da lignina quando comparado com a referência, contrário ao verificado em estudos (Hamed Younesi-Kordkheili e Antonio Pizzi (2018) / Johannes Karthäuser et al. (2024), o presente estudo apresenta valores sempre superiores ao limites mínimos propostos pela ABIMCI (2012), sendo a resistência ao cisalhamento na linha cola para valores acima de 1,0 MPa são considerados ideais independente da ruptura ocorrer na madeira ou no adesivo.

A resistência ao cisalhamento na linha de cola apresenta valores muito distintos embora o adesivo fenol-formaldeído seja utilizado em grande parte dos estudos. Mas, a elevada variação pode estar relacionada a espessura das lâminas, espécie de madeira além das propriedades do adesivo utilizado. Kordkheili e Antonio Pizzi (2018) obtiveram valores de resistência ao cisalhamento variando de 1,7 a 2,4 MPA para compensados produzidos com madeira de alta densidade variando de 0,55 a 0,71 g/cm³ (Beech).

Já Johannes Karthäuser et al. (2024) obtiveram valores entre 3 e 6,0 MPa para painéis produzidos com madeira de Scots pine (*Pinus sylvestris* from Bavaria, Alemanha) com espessura de 3 mm.

6.5 COMPARAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA ENTRE OS 3 MÉTODOS DE ADIÇÃO DE LIGNINA

Nesta seção são comparados os dados entre si por porcentagem de substituição da lignina, bem como também são comparados com dados obtidos na literatura.

6.5.1 Densidade

Tabela 11: Densidade

Tratamento	Densidade (Kg/m ³)	Método
T2 (10%)	566 A	Método 1
T4 (10%)	569 A	Método 2
T6 (10%)	603 A	Método 3
T3 (20%)	582 A	Método 1
T5 (20%)	634 A	Método 2
T7 (20%)	606 A	Método 3

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $\alpha = 5\%$)

Fonte: Elaborada pelo autor

Comparando os dados obtidos para 10% nota-se que não houve diferença estatística entre os métodos, e que, numericamente também não houve grande variação entre os dados. Para os dados obtidos com substituição de 20% novamente não houve variação estatística, e novamente não houve grande variação, porém identificou-se que no Método 1 a densidade se apresentou superior o Método 1 e Método 2, se comparado com as Etapa de 10% o mesmo ainda é superior.

Visto o aumento da densidade a partir da inserção de maior quantidade de lignina no adesivo, em todas as metodologias, pode-se indicar uma vantagem tecnológica e ambiental ao mesmo tempo, sendo que o estudo desenvolvido por Schueler (2017) indica que o aumento da densidade do painel pode proporcionar à redução de até 50% da emissão de formaldeído. No caso deste estudo, a lignina Kraft pode exercer uma maior influência, já que possui em sua composição grupos desconhecidos ao longo de sua estrutura, que podem interagir com o formaldeído, impedindo a sua liberação ao ambiente, permanecendo retido no painel.

Os resultados de densidade obtidos neste estudo foram superiores aos encontrados por Magalhães et al., (2019), em todas as Etapas, até mesmo em relação a fabricação do painel utilizando apenas o fenol-formaldeído (505,61 kg/m³).

Ainda comparando os resultados de densidade obtidos neste estudo com os alcançados por Mendoza et al., (2017), novamente os dados deste estudo foram superiores em todas os métodos, visto que Mendoza et al.,2017 encontro um valor médio de (0,554 g/cm³).

6.5.2 Teor de Umidade

Tabela 12: Teor de Umidade

Tratamento	Teor de Umidade (%)	Método
T2 (10%)	9,62 B	Método 1
T4 (10%)	11,9 B	Método 2
T6 (10%)	6,69 A	Método 3
T3 (20%)	9,82 B	Método 1
T5 (10%)	9,88 B	Método 2
T7 (20%)	5,79 A	Método 3

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $\alpha = 5\%$)

Fonte: Elaborada pelo autor

Analisando os dados obtidos nas três etapas para substituição de 10% de adesivo, nota-se que o Método 3 apresentou diferença estatística e numérica entre os demais dados, se apresentando como a melhor média de umidade. Nota-se ainda que a substituição parcial de lignina, possibilitou ao painel ser menos susceptível a umidade, dado ao fato de a lignina ser uma substância hidrofóbica, inibindo essa característica. Comparando os dados obtidos com o de Mendoza et al., (2017) percebe-se que o Método 1 e Método 2 foram superiores, visto que ele obteve uma média de 8,690 %, já o Método 3 apresentou resultados inferiores. 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.

6.5.3 Cisalhamento na linha de cola

Tabela 13: Cisalhamento na linha de cola

Tratamento	Tv (MPa)	Método
T2 (10%)	1,39 A	Método 1
T4 (10%)	1,82 A	Método 2
T6 (10%)	1,48 A	Método 3
T3 (20%)	1,15 A	Método 1
T5 (10%)	1,75 A	Método 2
T7 (20%)	1,40 A	Método 3

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si
(Tukey, $\alpha = 5\%$)

Fonte: Elaborada pelo autor

Quando comparados entre si estatisticamente notamos que em ambos os casos (10% e 20%), não ocorre diferença significativa. Contudo fazendo uma análise numérica é possível observar que em ambos os casos a Método 1 apresentou menores resultados em relação aos demais Métodos, nota-se que conforme adicionou-se mais lignina ocorreu redução na tensão de cisalhamento. Ainda, comparando os resultados da Método 1 com o catálogo da ABIMCI, os valores obtidos, não atingiram o valor mínimo (1,47 MPa). Isso pode ser justificado pelo fato da utilização do fenol cristal para a fenolação, o qual este, pode ter prejudicado a estrutura molecular da Lignina utilizada, prejudicando então as propriedades mecânicas realizadas e delaminando a maioria dos corpos de prova.

Dentre os três Métodos, pode-se dizer que o Método 2 apresentou médias maiores em relação as demais, o qual apenas o tempo e temperatura foram fatores predominantes neste Método, não havendo nenhuma outra intercorrência de produto adicionado, ainda, o Método 3 exibiu dados superiores ao mínimo especificado pela ABIMCI.

No estudo conduzido por Bortoletto Júnior (2003) utilizando apenas a resina fenol- formaldeído como agente ligante, o cisalhamento variou de 2,5 a 2,7 Mpa, valores relativamente superiores ao encontrados neste estudo.

O estudo desenvolvido por Ferreira et. al, (2012) utilizando adesivo PVA apresentou médias superiores a 3 Mpa. Em comparação com o FF (2,41 MPa) e FF+

lignina, um adesivo estrutural, os adesivos PVA demonstraram valores mais elevados. Resultados próximos a Método 2 deste trabalho foram observados por Almeida et al. (2004), que registraram valores de 1,91 e 1,68 MPa. Portanto, os adesivos PVA mostraram-se superiores, inclusive quando comparados com a ureia-formaldeído.

Ainda, comparando os resultados deste estudo ao de Ferreira (2017), o qual obteve uma média de (3,75 Mpa), os dados apresentados para este estudo com FF e FF+lignina foram inferiores.

Os resultados obtidos neste estudo apresentam valores médios superiores aos encontrados por Iwakiri et al. (2002) que registraram valores variando de 0,94 a 1,26 MPa para painéis compensados de Pinus Taeda fabricados com resina FF.

6.5.4 Módulo de Ruptura Perpendicular (MOR-PE) e Paralelo (MOR-PA)

Tabela 14: MOR-PE e MOR-PA

Tratamento	MOR-PE (MPa)	Método
T2 (10%)	23,89 A	Método 1
T4 (10%)	28,76 A	Método 2
T6 (10%)	17,69 A	Método 3
T3 (20%)	20,82 A	Método 1
T5 (10%)	12,69 B	Método 2
T7 (20%)	14,81 B	Método 3
Tratamento	MOR-PA (MPa)	Método
T2 (10%)	31,39 A	Método 1
T4 (10%)	42,24 A	Método 2
T6 (10%)	36,85 A	Método 3
T3 (20%)	23,76 B	Método 1
T5 (10%)	56,76 A	Método 2
T7 (20%)	33,1 B	Método 3

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $\alpha = 5\%$)

Fonte: Elaborada pelo autor

Analisando os valores obtidos no ensaio de flexão estática para MOR-PE e MOR-PA, pôde-se observar que em 10% de substituição não houve diferença significativa entre os dados dos três Métodos, em nenhuma das direções, visto também, que numericamente em ambas as direções o segundo Método apresentou dados superiores as demais. Já quando consideramos a substituição em 20% em

MOR-PE vemos que ocorre diferença significativa entre o Método 1 e as demais, e que numericamente a mesma também se caracteriza como superior. Já em MOR-PA notamos que houve variação estatística entre o Método 2 e as demais etapas, onde o Método 2 em 20% apresentou uma média superior (56,46), caracterizando como o melhor valor estatisticamente e numericamente.

Comparado com os dados evidenciado por Júnior e Garcia (2004), (MOR-PE: 32 Mpa e MOR-PA: 34 MPa) e por Ferreira (2017) (MOR-PE: 32,89 MPa e MOR-PA: 59,93 MPa), os dados deste estudo considerando o MOR-PE foram inferiores, considerando todas os Métodos e porcentagens de substituição de lignina, no entanto, no Método 2- 10% obtiveram-se uma média superior ao determinado pela ABIMCI (24,81 Mpa). Já em relação ao MOR-PA obtivemos valores superiores ao de Júnior e Garcia (2004) no Método 2 em ambas as porcentagens. Em relação ao estudo de Ferreira (2017), os dados deste estudo foram inferiores. Considerando o valor exigido pela ABIMCI (37,36 MPa) o Método 2 apresentou dados elevados.

6.5.5 Módulo de Elasticidade Perpendicular (MOE-PE) e Paralelo (MOE-PA)

Tabela 15: MOE-PE e MOE-PA

Tratamento	MOE-PE (MPa)	Método
T2 (10%)	1647 B	Método 1
T4 (10%)	2616 A	Método 2
T6 (10%)	1745AB	Método 3
T3 (20%)	1574 A	Método 1
T5 (10%)	1213 A	Método 2
T7 (20%)	1754 AB	Método 3
Tratamento	MOE-PA (MPa)	Etapa
T2 (10%)	4053 AB	Método 1
T4 (10%)	6306 A	Método 2
T6 (10%)	2372 A	Método 3
T3 (20%)	3467 B	Método 1
T5 (10%)	8556 A	Método 2
T7 (20%)	4266 AB	Método 3

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si

(Tukey, $\alpha = 5\%$)

Fonte: Elaborada pelo autor

Tomando o MOE-PE como referência identificamos que dentre as três Métodos de 10% de substituição do adesivo, estatisticamente houve diferença entre o Método 2 e Método 1 e não houve diferença entre Método 1 e Método 3. Numericamente Avaliando o Método 2 apresentou médias superiores dos demais Métodos. Em 20% de substituição não identificamos diferença estatística entre as Métodos, também, numericamente o Método 1 apresentou valor maior. No que se refere ao MOE-PA em 10% notamos diferença estatística entre os dados obtido no Método 2 e Método 3, e, não verificamos diferença entre o Método 2 e Método 3 e entre Método 1 e Método 3, no entanto, numericamente notamos o dados do Método 2 significativamente superior aos demais. Para 20%, notamos diferença estatística entre os dados obtidos no Método 2 e Método 1, e, não verificamos diferença entre a Método 2 e Método 3 e entre Método 1 e Método 3, visto que numericamente, novamente o dado obtido no Método 2 se caracteriza superior.

Comparando os dados obtidos neste estudo com os dispostos na literatura como: Ferreira (2017) que identificou para MOE-PE: 3624 MPa e MOE - PA: 8958 MPa, Júnior e Garcia (2004), obteve para MOE PA: 4474 MPa e MOR PE: 3606MPa, notamos que o MOE- PE em ambas as porcentagens foram inferiores aos da literatura, já para MOE-PA o único dado inferior ao da literatura foi em 10% do Método 3. Ainda, nota-se que em 20% do Método 2 o valor obtido foi próximo identificado por Ferreira (2017) para painéis produzidos com resina FF. Considerando os valores da ABIMCI (MOE-PE 2784,0 MPa e MOE-PA 6766,5) nenhuma das direções apresentaram valores inferiores.

6.6 RESUMO DOS RESULTADOS FÍSICO-MECÂNICO

Essa seção apresenta uma breve descrição do melhor método de mistura do adesivo com a lignina.

Tabela 16: Melhor método para confecção do painel

Etapas	% de Lignina	Densidade (Kg/m³)	Teor de Umidade (%)	MOE-PA (Mpa)	MOR-PA (Mpa)	MOE-PE (Mpa)	MOR-PE (MPA)	Cisalhamento (Mpa)
1	10	566	9,62	4053	31,39	1647	23,89	1,39
	20	582	9,82	3467	23,76	1574	20,82	1,15
2	10	569	11,9	6306	42,24	2616	28,76	1,82
	20	634	9,88	8556	56,76	1574	12,69	1,75
3	10	603	6,69	2372	36,85	1754	17,69	1,48
	20	606	5,79	4266	33,1	1213	14,81	1,36

*As células em destaque apresentam valores superiores em relação as demais.

Fonte: Elaborada pelo autor

Após a realização de testes para cada Método de confecção do adesivo e sua interação com as lâminas de madeira para a confecção dos painéis de madeira compensada, identificamos que em praticamente todos os ensaios realizados, o Método 2 apresentou destaque. Esse Método é marcado apenas pela interferência de tempo e temperatura da mistura, não se fazendo necessário nenhum agente químico para facilitar, o que caracteriza uma evolução tecnológica e ambiental em relação a adesivos.

7 CONCLUSÃO

A investigação de painéis compensados submetidos a substituição parcial do adesivo fenol-formaldeído pela lignina, surgiu como uma proposta intrigante em termos de desempenho físico-mecânico. Sendo, particularmente relevante para sua aplicação na construção civil, onde esses painéis requerem propriedades de resistência adequadas para desempenhar eficazmente as funções para as quais são destinados.

Com os resultados obtidos neste estudo pode-se concluir que, a substituição parcial de lignina ao adesivo, fenol formaldeído através do método de fenolação, não apresentou bons resultados quando comparados com o método de tempo e temperatura (Método 2) e síntese fenólica (Método 3). Destacando-se em melhor resultado físico (Densidade) o Método 2 e (Umidade) Método 3, no entanto, não podemos descartar que o Método 2 em 20% apresentou um valor de umidade considerável, até mesmo quando comparado com a aplicação de fenol-formaldeído. Em relação aos ensaios mecânicos notamos novamente o destaque do Método 2 em relação os outros Métodos

Destaca-se notavelmente o teste de teor de umidade, no qual foram identificadas diferenças estatisticamente significativas, apontando para uma aprimoração no comportamento dos painéis. Pode-se afirmar que a substituição de lignina conferiu ao painel uma menor susceptibilidade à umidade quando exposto à temperatura ambiente. Essa característica pode ser atribuída à natureza hidrofóbica da lignina.

Ainda podemos considerar o aumento da densidade que pode ser caracterizada pelo fato da retenção de formaldeído em sua estrutura, fator que pode ser atribuída a estrutura da lignina que pode apresentar ramificações que inibem parcialmente a emissão.

Outras pesquisas que incorporaram lignina ao adesivo, como o estudo conduzido por De Magalhães (2019), sugerem que a substituição por lignina pode ser viável em até 50%, sem impactar negativamente as propriedades do painel. Isso favorece as condições de aplicabilidade desses materiais. Além disso, a metodologia empregada neste estudo demonstrou superioridade em relação a algumas utilizadas em pesquisas anteriores. Por exemplo, abordagens como o tratamento térmico na lignina, adotadas em outras investigações, prejudicaram as propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

Mediante aos resultados obtidos, foi exposto que o melhor método de mistura da lignina ao fenol-formaldeído é quando se aplica o tempo em função da Temperatura.

7.1 ESTUDOS FUTUROS

- Abordagem de novas porcentagens de substituição de fenol-formaldeído pela lignina;
- Abordagens de Novas metodologias de substituição;
- Desenvolvimento de estudos ambientais para análise da interferência dessa substituição do fenol-formaldeído no ciclo de vida do produto;
- Aplicação de modelos de negócios da economia circular.

REFERÊNCIAS

ADESÃO e Adesivos. Curitiba: FUPEF, p. 1–30, 2005.

ALBINO, V. C. S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Estudo da colagem da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden com adesivo resorcinol-formaldeído. **Cerne**, Lavras, v. 16, p. 443-449, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/VPrYtSgjQrwgM93zkd6Hmpy/?lang=pt>. Acesso em: 23 jun. 2020.

ALMEIDA, R. R.; BORTOLETTO, G.; JANKOWSKY, I. P. Produção de compensados a partir da madeira de clones do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Floresta e ambiente**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 1, p. 14-24, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/r8wMsFL4XLDtWyQ8pDdRJYh/?lang=pt>. Acesso em: 12 jun. 2020.

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**, São Carlos, v. 419, n. 1-2, p. 161-167, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040603104000905>. Acesso em: 26 maio 2021.

ALVES, C. A.; ALCIOLE, S. D. G. Formaldeído em escolas: uma revisão. **Química nova**, São Paulo, v. 35, n. 10, p. 2025-2039, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/TsKGSK5BJXt8nkRmJRX9Zw/?lang=pt>. Acesso em: 25 maio 2021.

ARAÚJO, C. K. C. *et al.* Life cycle assessment as a guide for designing circular business models in the wood panel industry: A critical review. **Journal of cleaner production**, Amsterdam, v. 355, p. 131729, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622013427>. Acesso em: 08 jan.2023.

ASSIS, T. F. Estratégias de melhoramento para a obtenção de madeira de qualidade para laminação e serraria. **Eucalyptus**, [s.l.], 2007. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2001_Estrategias+Melhoramento+Madeiras+Laminacao+Serraria.pdf. Acesso em: 06 abr. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR16936** - EDIFICAÇÕES EM LIGHT WOOD FRAME. DEPÓSITO: 2023. CONCESSÃO: 2023. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9484**: Compensado: determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro: ABNT 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9485**: Compensado: determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9535:** Compensado: determinação do inchamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9533:** Compensado: determinação da resistência à flexão estática. Rio de Janeiro: ABNT, 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.** Miller Freeman Publications Rev., 1981. 300p. Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/unfao:615886/Description>. Acesso em: 12 mar. 2021.

BALDWIN, R. F. **Plywood and veneer-based products:** Manufacturing Practices. San Francisco: Miller Freeman Inc., 1995. Disponível em: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282272875906944>. Acesso em: 03 mar. 2021.

BORGES, P. H. M. *et al.* Estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas de painéis compensados e laminated veneer lumber (LVL). **Nativa**, Sinop, v. 5, p. 588-593, 2017. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/5044>. Acesso em: 25 jan. 2021.

BORTOLETO JÚNIOR, G. Produção de compensados com 11 espécies do gênero *Eucalyptus*, avaliação das suas propriedades físico-mecânicas e indicações para utilização. **Scientia forestalis**, Piracicaba, v. 63, p. 65-78, 2003. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr63/cap06.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2021.

BORTOLETTO JÚNIOR, G.; GARCIA, J. N. Propriedades de resistência e rigidez à flexão estática de painéis osb e compensados. **Revista árvore**, Viçosa, v. 28, p. 563–570, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/zQv5VqgKYrzG8QPXDdqJLjK/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 12 abr. 2021.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. *et al.* Painéis compensado de eucalipto: estudo de caso de espécies e procedências. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 1, p. 10–18, 2009. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/744/74413015002.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2021.

BUZO, A.L. S. C. *et al.* Painéis de pinus e bagaço de cana empregando-se dois adesivos para uso na construção civil. **Ambiente Construído**, Porto

Alegre, v. 19, p. 183-193, 2019. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/ac/a/5dnD8vDCY4trw3bTvNPY9FQ/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 12 maio 2021.

CÉSAR, A. **Estudo da interação adesivo-partícula em painéis OSB (Oriented Strand Board)**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011. Disponível em: <http://177.105.2.222:8080/handle/1/2302>. Acesso em: 10 nov. 2023.

COSTES, L. *et al.* Phytic acid – lignin combination: A simple and efficient route for enhancing thermal and flame retardant properties of polylactide. **European Polymer Journal**, Reino Unido, [s. l.], v. 94, n. July, p. 270–285, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001430571730650X>. Acesso em: 15 mar. 2021.

DIAS, L. M. S. **Síntese e caracterização de adesivos de lignina Kraft de eucalipto**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/2458/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_S%C3%ADntese%20e%20caracteriza%C3%A7%C3%A3o%20de%20adesivos%20de%20lignina%20kraft%20de%20eucalipto.pdf. Acesso em: 15 ago.2022.

DUNKY, M. Urea–formaldehyde (uf) adhesive resins for wood. **International journal of adhesion and adhesives**, Reino Unido, v. 18, n. 2, p. 95–107, 1998. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749697000547>. Acesso em: 12 fev.2021.

EMERSON, D. W. V. **Métodos de análise de formaldeído e otimização da reação de hantzsch**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/tccpublicados/tccdenisemerson.pdf>. Acesso em: 23 out.2023.

FERREIRA, B. S. *et al.* Physical and mechanical properties of plywood produced with thermally treated pinus taeda veneers. **Forests**, Basileia,v. 13, n. 9, p. 1398, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/9/1398>. Acesso em: 25 set. 2023.

FERREIRA, B. S.; SILVA, J. V. F.; CAMPOS, C. I. Static bending strength of heat- treated and chromated copper arsenate-treated plywood. **Bioresources**, Carolina do Norte ,v. 12, n. 3, p. 6276– 6282, 2017. Disponível em: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wpcontent/uploads/2017/07/BioRes_12_3_6276_Ferreira_CS_Static_Bending_Strength_Heat_Treated_CC_Treat_Plywood_12117.pdf. Acesso em: 13fev. 2022.

FERREIRA, B. S. *et al.* Cisalhamento na linha de cola de compensados de eucalyptus sp. E adesivo PVA. **Floresta e ambiente**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 2, p. 141-146, 2012. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/loram/a/RbwzDyckhMNJWX4zzgsMnxG/?lang=pt>. Acesso em: 28 mar. 2021.

FERREIRA, M. Escolha de espécies de eucalipto. **Circular técnica IPEF**, v. 47, p. 1–30, 1979. Disponível em: <https://www.ipef.br/PUBLICACOES/ctecnica/nr047.pdf>. Acesso em: 21 maio 2021.

FOELKEL, C. **Química dos processos de produção de celulose**. Belo Oriente: CENIBRA/UFV, 1977.

FOELKEL, C. Individualização das fibras da madeira do eucalipto para a produção de celulose kraft. **Eucalyptus**, [s.l.], v. 2, p. 107, 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/CelsoFoelkel/publication/267996914_Julho_2009_Individualizacao_das_Fibras_da_Madeira_do_Eucalipto_para_a_Producao_de_Celulose_Kraft/links/56f92a1a08ae81582bf4332f/Julho-2009-Individualizacao-das-Fibrasda-Madeira-do-Eucalipto-para-a-Producao-de-Celulose-Kraft.pdf. Acesso em: 23 out. 2020.

FRIHART, C. R. Wood adhesion and adhesives. In: ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005. p. 255-313. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780203492437/handbook-wood-chemistry-wood-composites-roger-rowell-roger-rowell>. 25 mar. 2021.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesives with wood materials: bond formation and performance. In: ROSS, R. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: Forest Products Laboratory, 2010 543. p. 10.1-10.24. Disponível em: <https://kh.aquaenergyexpo.com/wp-content/uploads/2023/02/Wood-as-AnEngineering-Material-Adhesives-with-Wood-Materials.pdf>. Acesso em: 15 set. 2021.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. *et al.* Environmental performance assessment of hardboard manufacture. **The international journal of life cycle assessment**, Berlin, v. 14, p. 456– 466, 2009. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-009-0099-z>. Acesso em: 10 nov. 2021.

IRLE, M. A. *et al.* 10 Wood Composites. In: ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. 2th ed. 2012. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=Kn_RBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA321&dq=IRLE,+M.+A.+et+al.+10wood+composites.Handbook+of+wood+chemistry+and+wood+composites,+CRC+Press,+v.+321,+2012.&ots=pDriZ2fmjy&sig=S8W6BxFMQuXHgmIq2anb0LqmVTA. Acesso em: 29 ago. 2021.

IWAKIRI, S. Painéis de madeira: características tecnológicas e aplicações. **Revista da madeira**, [s.l.], 2003.

IWAKIRI, S. *et al.* Produção de compensados de pinus taeda e pinus

oocarpa com resina fenol-formaldeído. **Cerne**, Lavras, v. 8, n. 2, p. 92–97, 2002. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/744/74480208.pdf>. Acesso em: 23 out. 2021.

JIA, L. *et al.* Formaldehyde and voc emissions from plywood panels bonded with bio-oil phenolic resins. **Environmental pollution**, Barking, v. 264, p. 114819, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026974912031006X>. Acesso em: 25 maio 2021.

JANKOWSKY, I. P.; AGUIAR, O. J. Manufatura de painéis compensados som eucalyptus: Caracterização de diversas espécies. **Floresta**, Curitiba, v.14, n. 1, 1983. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001687729>. Acesso em: 20 jan. 2021.

KARRI, R. *et al.* Bond quality of poplar plywood reinforced with hemp fibers and ligninphenolic adhesives. **Composites part C: Open access**, v. 9, p.100299, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666682022000639>. Acesso em: 26 ago.2021.

KARTHÄUSER, J. *et al.* Modification of plywood with phenol–formaldehyde resin: substitution of phenol by pyrolysis cleavage products of softwood kraft lignin. **European journal of wood and wood products**, Berlin, v. 82, n. 2, p. 309-319, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-023-02029-z>. Acesso em: 12 jul. 2021.

KAZMIERCZAK, S.; HILLIG, E.; IWAKIRI, S. Painéis compensados fabricados com lâminas de três espécies de eucaliptos. **Floresta e ambiente**, Rio de Janeiro, v. 24, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/loram/a/njyHQm6Zs4JM7Wq8rWTTTSc/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 21 out. 2021.

KHAN, M. A.; ASHRAF, S. M.; MALHOTRA, V. P. Eucalyptus bark lignin substituted phenol formaldehyde adhesives: A study on optimization of reaction parameters and characterization. **Journal of applied polymer science**, Switzerland, v. 92, n. 6, p. 3514–3523, 2004. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.20374>. Acesso em: 17 abr. 2021.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J.; **Principles of wood science and technology**: Wood based materials. Berlin: Springer-Verlag, 1975. Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-infor-cl-20.500.12220-2509/Description>. Acesso em: 15 mar. 2021.

LIMA, N. N. *et al.* Mechanical and physical properties of LVL panels made from three amazonic species. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 407-413, 2013. Disponível em: <https://cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/view/919>. Acesso em: 28 maio 2021.

LUCKMAN, S. S. *et al.* Influência da incorporação de lignina Kraft à resina ureiaformaldeído nas propriedades tecnológicas de painéis aglomerados convencionais. **Scientia forestalis**, Piracicaba, v. 49, n.131, p. e3527, 2021. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr131/2318-1222-scifor-49-131-e3527.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2022.

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**, Berlin, v. 68, n. 3, p. 879–890, 2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00289-011-0658-x>. Acesso em: 27 mar. 2021.

MAGALHÃES, M. A. de *et al.* Substituição de lignina kraft à resina fenólica para a fabricação de compensados. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, Pelotas, v. 10, n. 2, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/cienciadamadeira/article/view/14530>. Acesso em: 12 fev. 2022.

MARCHESAN, R. *et al.* Paineis cimento-madeira produzido por compactação vibro dinâmica no sul do Tocantins, 2022. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/86827380/220207709.pdf>. Acesso em: 21 abr.2023.

MARRA, A. A. **Technology of wood bonding**. Van Nostrand Reinhold, 1992. Disponível em: <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/2539>. Acesso em: 12 jan. 2021.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; LACERDA, F. d. C. **Painéis de madeira no brasil**: panorama e perspectivas. Rio de Janeiro :Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2008. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2526>. Acesso em: 27 mar. 2021.

MENDOZA, Z. M. S. H. **Efeito da inclusão laminar nas propriedades de painéis aglomerados fabricados com resíduos da indústria laminadora**. 2010. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010. 109f. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/552>. Acesso em: 30 de jul.2022.

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**, Berlin, v. 23, p. 957–969, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-017-1343-6>. Acesso em: 23 ago. 2021.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. **Fao stat**, [s.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/es/#compare>. Acesso em 24 de julho de 2024.

PAIVA, N. T. N. **Desenvolvimento de uma resina ureia formaldeído de baixa emissão de formaldeído fortificada com melamina**. 2010. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010. Disponível em: <https://search.proquest.com/openview/12f6445154ae2910b45f2879da5e1820/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>Access. Acesso em: 15 jun.2021.

Panel Guide. Version 4. ISBN 978-1-909594-21-0.2014
 PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (ed.). **Handbook of adhesive technology**. 3 th. ed. Boca Raton: Taylor and Francis, c2018. Disponível em:<https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=5DsPEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Handbook+of+adhesive+technology.+&ots=hVQJHKL1mz&sig=FxOnpiT6bwXjuknkVq7uhxfv11Q>. Acesso em: 15 fev. 2021.

PIZZI, A.; MITTAL, K.L. **Handbook of adhesive technology**. 3 th ed. New York: Taylor and Francis, c2018. 680 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=5DsPEAAQBAJ&oi=fnd&pg=P1&dq=Handbook+of+adhesive+technology.+&ots=hVQJHKL1mz&sig=FxOnpiT6bwXjuknkVq7uhxfv11Q>. Acesso em: 13 jun. 2021.

RIBASKI, N. G. Conhecendo o setor florestal e perspectivas para o futuro. **Brazilian journal of animal and environmental research**, Curitiba, v. 1, n. 1, p. 44–58, 2018. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/329>. Acesso em: 25 set. 2021.

SANTOS, L. C. **Síntese e caracterização de adesivos lignina-fenol formaldeído para madeira e derivados**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016. Disponível em: <https://poscienciaflorestal.ufv.br/wpcontent/uploads/2023/05/Larissa-Carvalho-Santos.pdf>. Acesso em: 03 jun.2021.

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

SELLERS, T. **Plywood and adhesive technology**. New York: Marcel Dekker, c1985. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=Wqct82LvVB0C&oi=fnd&pg=PA1&dq=Plywood+and+adhesive+technology&ots=f9W4SCh-j&sig=Y9y2Zwljhgvvex2NPCD-8fF4las>. Acesso em: 17 abr. 2021.

SILVA, D. A. L. **Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil**. 2012. Dissertação (Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-31072012-121351/en.php>. Acesso em: 15 ago. 2023.

SILVA, D. A. L. *et al.* Life cycle assessment of medium density particleboard (MDP) produced in Brazil. **The international journal of life cycle assessment**, Berlin, v. 18, p. 1404-1411, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-013-0583-3>. Acesso em: 14 mar. 2021.

SILVA, M. A. *et al.* Utilização de lignosulfonato e adesivo Fenol-Formaldeído na produção de painéis aglomerados. **Scientia forestalis**, Pelotas, v. 45, p. 423-433, 2017. Disponível em: <https://www.ipef.br/PUBLICACOES/SCIENTIA/nr115/cap01.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.

SILVEIRA, D. T.; CÓRDOVA, F. P. A pesquisa científica. *In*: GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Rio Branco: Editora UFRGS, 2009. p. 31-42. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/213838/000728731.pdf>. Acesso em: 12 set. 2021.

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**, Berlin, v. 18, p. 636-646, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-012-0506-8>. Acesso em: 19 fev. 2021.

SOLT, P. *et al.* Technological performance of formaldehyde-free adhesive alternatives for particleboard industry. **International journal of adhesion and adhesives**, Reino Unido, v.94, p. 99-131, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749619300946>. Acesso em: 29 set. 2021.

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**, Reino Unido, v. 112, p. 228–240, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014305718320597>. Acesso em: 17 jul. 2021.

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

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, v. 19, n. 3, p. 277–285, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/7xkYCBzgHN9bpnjvrjg4kyC/?lang=pt>. Acesso em: 15 ago. 2021.

WALKER, J.C.F. **Primary wood processing**: principles and practice. 2 th. ed. Dordrecht: Springer, c2006. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=wJI0LwnyP4C&oi=fnd&pg=PR9&dq=Primary+wood+processing:+principles+and+practice.+&ots=YwFbRI8c6n&sig=1xv43udGwdefdzfX03pRhR53J4>. Acesso em: 21 ago. 2021.

YOUNESI-KORDKHEILI, H.; PIZZI, A. Properties of plywood panels bonded with ionic liquid-modified lignin–phenol–formaldehyde resin. **The journal of adhesion**, Londres, v. 94, n. 2, p. 143-154, 2018. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00218464.2016.1263945>. Acesso em: 16 jul. 2021.

YOUNGQUIST, J. A. Wood-based composites and panel products. *In*: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook**: Wood as an engineering material, p. 10.1, 1999. v. 113. Disponível em: https://nickengler.com/KnowHow/Wood/Wood_Handbook/Ch10.pdf. Acesso em: 17 abr. 2021.

**APÊNDICE A - RESUMO DAS REGRAS DE ELABORAÇÃO DO TRABALHO
DADOS CURRICULARES**

IDENTIFICAÇÃO	
Nome e data de nascimento	CRISTIANE KARYN DE CARVALHO ARAUJO 10/11/1994
Nacionalidade	Brasileira
Nome em citações bibliográficas:	ARAUJO, Cristiane Araújo, C.
Currículo Lattes	http://lattes.cnpq.br/7617120058376049
ORCID	https://orcid.org/0000-0002-8299-690X
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2012/2017	Engenharia Industrial Madeireira - Graduação Unesp- Instituto de Ciências e Engenharia
2018/2020	Engenharia de Produção - Mestre Universidade Tecnológica Federal do Paraná- UTFPR
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
DE CARVALHO ARAÚJO, CRISTIANE KARYN; BIGARELLI FERREIRA, MARIANE; SALVADOR, RODRIGO; DE CARVALHO ARAÚJO, CAMILLA KAWANE CECILIANO; CAMARGO, BRUNO SILVA; DE CARVALHO ARAÚJO CAMARGO, SÂMIQUE KYENE; DE CAMPOS, CRISTIANE INÁCIO; PIEKARSKI, CASSIANO MORO. Life cycle assessment as a guide for designing circular business models in the wood panel industry: A critical review. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, v. 355, p. 131729, 2022. CAMARGO, S. K. C. A.; VENTORIM, G.; CAMARGO, B.S.; ARAUJO, C. K. C.; ARAUJO, C. K. C.; SOARES, L. R. L.; FERRAZ, A. P. A. Ultraviolet Resonance Raman Spectroscopy Analysis of Carbonyl Groups Present after Different Bleaching Stages for Various Bleach Sequences. BioResources, v. 14, p. 1915-1927, 2019. DE CARVALHO ARAÚJO, CRISTIANE; SALVADOR, RODRIGO; MORO PIEKARSKI, CASSIANO; SOKULSKI, CARLA; DE FRANCISCO, ANTONIO ; DE CARVALHO ARAÚJO CAMARGO, SÂMIQUE . Circular Economy Practices on Wood Panels: A Bibliographic Analysis. Sustainability, v. 11, p. 1057, 2019. ARAUJO, C. K. C.; CAMPOS, C. I.; CAMARGO, S. K. C. A.; CAMARGO, B.S.. Caracterização mecânica de painéis particulados de média densidade produzidos a	

partir de resíduos de madeira. Revista Gestão Industrial (Online), v. 15, p. 197, 2019.

PIEKARSKI, CASSIANO MORO; PUGLIERI, FÁBIO NEVES; ARAÚJO, CRISTIANE KARYN DE CARVALHO; BARROS, MURILLO VETRONI; SALVADOR, RODRIGO. LCA and ecodesign teaching via university-industry cooperation. International Journal of Sustainability in Higher Education, v. 20, p. 1061-1079, 2019.

CAMARGO, S. K. C. A.; CAMARGO, B.S.; VENTORIM, G.; ARAUJO, C. K. C. Análise da Viscosidade em diferentes sequências de branqueamento ECF. Engevista (UFF), v. 19, p. 1110-1120, 2017.

PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES

Bancas de trabalhos de conclusão

SOBRENOME, N.; SOBRENOME, N.; SOBRENOME, N. Participação em banca de Nome Completo do Aluno. **Título do trabalho**. 2021. Dissertação (Mestrado em Nome do curso) - Nome da Universidade, Cidade, 2021.

PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS

International Joint Conference on Industrial Engineering and Operations Management- IJCIEOM, 2019, (Nova Sadi). The perception of knowledge management by small and medium-sized IT companies Brazil.