



**PRODUÇÃO E PROPRIEDADES DE PAINÉIS DE LÂMINAS
PARALELAS (LVL) COLADOS COM ÁCIDO CÍTRICO**

TAÍS RIBEIRO DA SILVA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA-UnB**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**PRODUÇÃO E PROPRIEDADES DE PAINÉIS DE LÂMINAS
PARALELAS (LVL) COLADOS COM ÁCIDO CÍTRICO**

TAÍS RIBEIRO DA SILVA

ORIENTADOR: Prof. Dr. CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**BRASÍLIA – DF
AGOSTO DE 2022**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**“PRODUÇÃO E PROPRIEDADES DE PAINÉIS DE LÂMINAS
PARALELAS (LVL) COLADOS COM ÁCIDO CÍTRICO”**

TAÍS RIBEIRO DA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS FLORESTAIS.

APROVADA POR:

Prof. Dr. CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);
(Orientador)

Prof. Dr. AILTON TEIXEIRA DO VALE (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB)
(Examinador Interno);

Profa. Dr. DIVINO ETERNO TEIXEIRA (Serviço Florestal Brasileiro - SFB)
(Examinador Externo);

Prof. Dr. ALEXANDRE FLORIAN DA COSTA (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB)
(Examinador Suplente).

Prof. Dr. RAFAEL RODOLFO DE MELO (Universidade Federal Rural do Semi-Árido)
(Examinador Suplente externo).

BRASÍLIA/DF, 26 DE AGOSTO DE 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

SS586p Silva, Taís Ribeiro da
Produção e propriedades de painéis de lâminas paralelas (LVL) colados com ácido cítrico / Taís Ribeiro da Silva; orientador Cláudio Henrique Soares Del Menezzi . -- Brasília, 2022.
50 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) -- Universidade de Brasília, 2022.

1. Propriedades da madeira. 2. Compostos estruturais .
3. Painéis de lâminas paralelas (LVL). 4. Biadesivo. 5. Ácido cítrico. I. Del Menezzi , Cláudio Henrique Soares , orient. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, Taís Ribeiro da. **Produção e propriedades de painéis de lâminas paralelas (LVL) colados com ácido cítrico**. 2022. 50 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Taís Ribeiro da Silva.

TÍTULO: Produção e propriedades de painéis de lâminas paralelas (LVL) colados com ácido cítrico.

GRAU: Mestre / ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva todos outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Taís Ribeiro da Silva

taisribeiroef@gmail.com

AGRADESCIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente, pelo suporte espiritual que busquei e busco sempre. Que em diversos momentos acalmou meu coração e me fez mais forte.

A minha família, pelo apoio e companheirismo, principalmente a minha mãe Rose Mary, que sempre me incentivou nas diversas escolhas da minha vida.

Aos meus amigos, principalmente Luana e Wesley, com quem mantive contato por todos os dias durante a pós-graduação, me incentivando, aconselhando e alegrando com suas boas conversas. A todos aqueles que me acolheram e ajudaram direta e indiretamente a finalizar esse ciclo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi, por acreditar no meu potencial, por todas as orientações e por todo conhecimento transferido a mim.

Ao programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da UnB, por todo suporte necessário que me permitiu chegar até aqui. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

PRODUÇÃO E PROPRIEDADES DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS (LVL) COLADOS COM ÁCIDO CÍTRICO

RESUMO GERAL

Os painéis de lâminas paralelas (LVL) são compostos estruturais formados pela colagem de lâminas dispostas paralelas a grã. Essa configuração, atribui ao produto resistência, boa estabilidade dimensional, além de produtos com dimensões ilimitadas. O ácido cítrico é um substância derivada de citrinos como laranjas e limões e que vem sendo utilizada como adesivo em painéis de madeira, devido as suas boas propriedades de ligações adesivas, as chamadas ligações éster. Dessa forma, estudos sobre a avaliação das propriedades físicas e mecânicas de painéis LVL colados com ácido cítrico, são de suma importância para contribuição da viabilidade deste produto no Brasil, visando a produção do mesmo a níveis comerciais. O objetivo do presente trabalho foi analisar a viabilidade de produção e as propriedades físicas e mecânicas de painéis de lâminas paralelas (LVL) confeccionados com adesivo ácido cítrico, e, comparar tais propriedades com as de painéis LVL produzidos com adesivo sintético. Os dados foram disponibilizados por Del Menezzi (2018). Para confecção do LVL foram utilizadas lâminas de *Pinus taeda*, com taxa de espalhamento de adesivo de 134 g/m². Foram utilizados três diferentes tratamentos (T1: ácido cítrico; T2: ácido cítrico e resina - MUF; T3: resina –MUF), num programa de prensagem de quatro etapas. Como resultado das análises dos dados, os painéis LVL compostos exclusivamente com melamina-ureia-formaldeído apresentaram os melhores valores médios para todas as propriedades físicas e mecânicas, entretanto, os painéis com ácido cítrico apresentaram resistência ao cisalhamento da linha de cola com valor superior ao mínimo requisito da norma Europeia EN314 (2004) comprovando a existência de coesão interna entre o ácido cítrico e a madeira. Desta forma, apesar das propriedades superiores dos painéis LVL colados exclusivamente com melamina-ureia-formaldeído, é possível produz painéis LVL colados com ácido cítrico.

Palavras-chave: Compostos estruturais, bioadesivo, lâminas, madeira.

PRODUCTION AND PROPERTIES OF LAMINATED VENEER LUMBER (LVL) PANELS BONDED WITH CITRIC ACID

GENERAL ABSTRACT

Laminated Veneer Lumber (LVL) are structural composites produced by gluing all veneers arranged parallel to grain in the longer direction of the structure. This configuration gives the product strength, good dimensional stability, as well as products with unlimited dimensions. Citric acid is a substance derived from citrus fruits such as oranges and lemons that has been used as an adhesive on wood panels, due to its good properties of adhesive bonds, the so-called ester bonds. Thus, studies on the evaluation of the physical and mechanical properties of LVL panels bonded with citric acid are of great importance to contribute to the viability of this product in Brazil, aiming at its production at commercial levels. The objective of the present work was to analyze the production feasibility and the physical and mechanical properties of LVL made with citric acid adhesive, and to compare these properties with those of LVL panels produced with synthetic adhesive. Data used as comparison were provided by Del Menezzi (2018). To produce LVL, *Pinus taeda* sliced veneers were used, with an adhesive spread rate of 134 g/m². Three different treatments were used (T1: citric acid; T2: citric acid and resin - MUF; T3: resin -MUF), in a four-step pressing program. As a result of the data analysis, the LVL panels composed exclusively with melamine-urea-formaldehyde presented the best average values for all physical and mechanical properties, however, the panels with citric acid presented shear strength of the glue line with a value higher than minimum requirement of the European standard EN314 (2004) proving the existence of internal cohesion between citric acid and wood. In this way, despite the superior properties of LVL panels bonded exclusively with melamine-urea-formaldehyde, it is possible to produce LVL panels bonded with citric acid.

Keywords: Structural compounds, bioadhesive, veneers, wood.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Representação da disposição de lâminas em painéis compensado e LVL.

FIGURA 2 - Fórmula estrutural do Ácido Cítrico.

FIGURA 3 - Mecanismo de reação de formação de ligação éster entre ácido cítrico e madeira.

FIGURA 4 - Equipamento de Prensagem *Joos Lap 150*

FIGURA 5 - Absorção de água após imersão por 2 e 24 horas do LVL para diferentes tratamentos.

FIGURA 6 - Resistência ao cisalhamento na linha de cola dos diferentes tratamentos.

FIGURA 7 - Resistência a compressão paralela dos diferentes tratamentos.

FIGURA 8 - Módulo de ruptura para os diferentes tratamentos.

LISTA DAS ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AA	Absorção de água.
AC	Ácido Cítrico.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AC/A	Ácido Cítrico/Amido.
AC/S	Ácido Cítrico/Sacarose.
S/C	Sacarose/Ácido Cítrico.
E_M	Módulo de Elasticidade em Flexão.
FF	Fenol Formaldeído.
UF	Ureia Formaldeído.
MF	Melamina Formaldeído.
RF	Resorcinol Formaldeído.
MUF	Melamina Ureia Formaldeído.
$f_{c,0}$	Compressão Paralela a Grã.
$f_{gv,0}$	Cisalhamento na Linha de Cola.
f_m	Módulo de Ruptura em Flexão.
g/cm^3	Grama por centímetros cubico (densidade).
°C	Graus Célsius.
IE	Inchamento em Espessura.
JIS	<i>Japanese Industrial Standards.</i>
LVL	<i>Laminated Veneer Lumber.</i>
MPa	Megapascal (Unidade de medida de pressão).
T1	Tratamento 1.
T2	Tratamento 2.
T3	Tratamento 3.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVO	13
3	HIPÓTESES	14
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
	4.1 Painéis de lâminas paralelas (LVL): características e propriedades.	15
	4.2 Ácido Cítrico: potenciais utilização na indústria madeireira.....	20
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	28
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
	6.1 Propriedades físicas.....	30
	6.2 Propriedades mecânicas.....	35
7	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	44

1 INTRODUÇÃO

Em meio a necessidade de minimizar as pressões ambientais e reduções de florestas devido à alta demanda por produtos madeireiros, surgem os produtos engenheirados de madeira (PEM). PEMs são produtos obtidos da junção de partes de madeira ou fibras vegetais que possuam propriedades superiores, a fim de adquirir melhor qualidade para estruturas (SANTOS et al., 2009). Entre os PEMs estão os Compostos Estruturais de Madeira ou Structural Composite Lumber (SCL), que são montados através da colagem de fibras, partículas, lascas, folheados e lâminas de madeira, que são prensados e cortados nas dimensões conforme o produto final. São considerados superiores a madeira maciça, por encontrarem-se disponíveis em grandes dimensões, sem deformidades e sem rachaduras (APA, 2022).

Entre os tipos de compostos estruturais está o Laminated Veneer Lumber (LVL), ou painel de lâminas paralelas, que consiste em um produto montado por lâminas selecionadas de madeira, que são coladas em mesma direção de grã e são prensadas (STARK; CAI, 2021; APA, 2022). Alguns produtos são obtidos da utilização do LVL, dependendo da categoria: os de uso estrutural, referentes a construção civil como flanges superiores e inferiores para vigas em “I”, para produção de residências, galpões, cruzetas, onde exigem elevada resistência a flexão; e os de uso não-estrutural, que compreendem os móveis, janelas, andaimes, escadas, etc (SOUZA; TEIXEIRA, 2002; BRIONES, 2007).

Os painéis do tipo LVL são de fácil trabalhabilidade e colagem, aceitam bem pregos e parafusos, apresentam elevadas propriedades mecânicas, principalmente de resistência a flexão e possuem boa estabilidade dimensional. A Europa dispõe de grandes produções de LVL, porém, apesar de todas as suas vantagens, no Brasil ainda não há produção a nível comercial desse produto, por isso, as pesquisas de viabilidade desses painéis vem crescendo no país (SANTOS; TEIXEIRA 2002; IWAKIRI et al., 2008; PALMA; BALLARIN, 2011; SANTOS, 2015).

Um componente de destaque na fabricação de painéis são os adesivos. Os adesivos são as substâncias que vão manter a união entre as superfícies de um determinado material. Devido ao seu alto custo, é de fundamental importância a escolha do tipo de adesivo, assim como a determinação de sua quantidade, pois isso permite otimizar a

relação custo/benefício. Há uma variedade de adesivos, e os mais utilizados na indústria de chapas e painéis de madeira, é o fenol-formaldeído, que apresenta alta resistência a umidade, sendo indicado para utilização em locais externos. Uma das principais desvantagens desses adesivos, é a toxicidade pela emissão de formaldeído, além do seu elevado custo (FIORELLI, 2002; IWAKIRI, 2005; MENDES, 2012; SANTOS, 2016; FERREIRA, 2017).

Na busca por adesivos de baixos custos e ambientalmente corretos, diversas pesquisas tem focado em adesivos orgânicos de origem animal como albumina e caseína, e de origem vegetal como taninos, gomas naturais, amidos, celulose, etc. (FIORELLI, 2002). Um adesivo que tem apresentado potencial uso na colagem de painéis, é o ácido cítrico. O ácido cítrico é um composto encontrado em citrinos como laranjas e limões, costuma existir nas formas anidra, que possui cristalização em altas temperaturas quando misturado a água, ou na forma monohidratada, com cristalização em água fria, quando exposto a temperaturas abaixo de 36,6°C (FOOD INGREDIENTS BRAZIL, 2014; MUÑOZ-VILLA, 2014).

O ácido cítrico como adesivo de painéis de madeiras, proporciona boa estabilidade dimensional, propriedades físicas e mecânicas superiores, principalmente as de flexão estática (Umemura et al., 2013; Widyorini et al., 2016a) e boa aderência, isso devido as ligações éster que acontecem entre grupos hidroxilas da madeira e os grupos carboxilas do ácido cítrico, conforme as pesquisas de Umemura et al. (2012a), sobre a possibilidade de utilização do ácido cítrico como adesivo de madeiras. Visto isso, pesquisas estão sendo desenvolvidas com intuito de aliar através da colagem, as boas propriedades de painéis LVL, com as características do ácido cítrico.

Dessa forma, estudos sobre a avaliação das propriedades físicas e mecânicas de painéis LVL colados com o bioadesivo ácido cítrico, são de suma importância na contribuição da viabilidade do produto no Brasil, principalmente por se utilizar de um adesivo atóxico e de menor custo, visando a produção do mesmo a níveis comerciais.

2 OBJETIVO

O presente estudo teve como objetivo analisar a viabilidade de produção e as propriedades físicas e mecânicas de painéis de lâminas paralelas (LVL) confeccionados com adesivo ácido cítrico, e, comparar tais propriedades com as de painéis LVL produzidos com adesivo sintético.

3 HIPÓTESES

H1: A utilização de ácido cítrico como adesivo para produção de painéis de lâminas paralelas, proporciona propriedades mecânicas e físicas que atendam ao mínimo requisitos da Norma Europeia EN 314-2.

H2: Painéis LVL com adesivo ácido cítrico tem comportamento similar a painéis LVL com adesivo Melamina-Ureia-Formaldeido.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Painéis de lâminas paralelas (LVL): características e propriedades.

Em um contexto de pressões ambientais, redução de recursos florestais e alta demanda por produtos madeireiros, surgem os produtos engenheirados de madeira (PEM). Conforme Lam (2001), os PEMs são produtos obtidos através da colagem e prensagem de pedaços de madeira, com o intuito de formar estruturas similares a madeira serrada. No contexto de produtos engenheirados de madeira, estão aqueles que podem ser feitos a partir de grandes toras de madeira, como o laminated veneer lumber (LVL), ou painel de lâminas paralelas. O LVL é um produto constituído por lâminas de madeira coladas e prensadas que são orientadas na mesma direção de grã (STARK; CAI, 2021), ou seja, paralelas entre si.

A fabricação do LVL se inicia na obtenção de lâminas de toras de madeira. As lâminas podem ser emendadas, o que permite dimensões de comprimento ilimitados. Após isso, essas lâminas são selecionadas conforme as suas propriedades físicas. As lâminas selecionadas vão para colagem, onde são sobrepostas paralelamente e camadas adesivas são depositadas entre elas, até adquirirem dimensões desejáveis, quando são prensadas a quente para cura adesiva e realizada a usinagem dessas peças (SOUZA; TEIXEIRA, 2002; SHIGUE, 2018).

O LVL começou a ser produzido na década de 1940 durante a segunda Guerra Mundial para fabricação de hélices de avião, devido a suas propriedades de resistência. Já em 1960, nos EUA, os pesquisadores Art Troutner e Herold Thomas utilizaram o LVL pela primeira vez na construção civil para fabricação de flanges superiores e inferiores de vigas em “I” (NEUVONEN; SALMINEN; HEISKANEN, 1998). Atualmente o LVL é utilizado em diversos produtos, dependendo da sua categoria, que pode ser estrutural, que se refere a construção civil, ou os não-estruturais, que compreendem móveis, janelas, andaimes, escadas, etc. (BRIONES, 2007).

No Brasil, o LVL ainda não é produzido a níveis comerciais, apesar de existirem diversas pesquisas acerca das propriedades do produto (IWAKIRI et al., 2008). A primeira delas, referente ao LVL ou painéis de lâminas paralelas, foi conduzida por Matos (1997), onde o pesquisador comprovou a viabilidade da produção de painéis LVL através da classificação da qualidade de lâminas da espécie *Pinus taeda* L. por meio de aplicação de ondas acústicas.

Após os estudos, Matos (1997) sugeriu que novas pesquisas fossem realizadas para avaliar outras propriedades dos painéis, como estabilidade dimensional, inchamento em espessura, resistência mecânica no sentido perpendicular a grã, entre outras. A partir disso, muitos trabalhos sobre os painéis LVL foram e são desenvolvidos atualmente.

Pio (2002), através de pré-avaliação não destrutiva de lâminas, testou a viabilidade de produção de LVL estrutural de *Eucalyptus grandis* hill ex-Maiden. Para confecção dos painéis, utilizou oito árvores de 15 anos e sete árvores de 20 anos em lâminas com 2,0 mm e 2,6 mm de espessura para ambas idades. Cada painel foi composto por 13 lâminas e a classificação dessas lâminas foi feita por avaliação não destrutiva através do módulo de elasticidade dinâmico e pela metodologia utilizada por Matos (1997), onde as lâminas foram agrupadas em classe de resistência. Dessa forma, o autor constatou que a divisão de lâminas em classe de resistência influenciou no aumento da resistência mecânica dos painéis, o que possibilita a sua produção a níveis comerciais.

Outro estudo relacionado ao LVL no Brasil, foi o de Pedrosa (2003), sobre a avaliação da performance de flanges de LVL de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden em vigas em “I”. A autora utilizou cinco painéis de cada espécie com 11 camadas e espessura de 32 mm, além das lâminas coladas com adesivo a base de Resorcinol-formaldeído. Após os ensaios físicos e mecânicos das vigas em “I”, foi encontrado uma excelente relação resistência/espessura dos flanges nas vigas em “I”. A classificação das lâminas para constituição dos painéis foi considerada válida e a utilização da espécie *Eucalyptus dunnii* Maiden foi viável para a composição.

Uma das principais vantagens dos painéis LVL em relação à madeira serrada é a superioridade em termos de resistência e homogeneidade. Como a madeira é um material heterogêneo, existe a dificuldade de se controlar os ditos defeitos de sua estrutura anatômica como os nós. A seleção das lâminas para formação do painel LVL permite que ocorra a eliminação ou a dispersão de defeitos e nós para pontos de menores interferências às propriedades do material, o que lhe proporciona maior resistência (PALERMO et al., 2005).

Pease (1994), citado por Iwakiri et al. (2010), relatou a flexibilidade dimensional dos painéis LVL como vantagem sobre a madeira serrada, o que possibilita a fabricação de painéis com qualquer comprimento e largura, além de permitir a utilização de madeira de várias espécies na sua composição. Faria et al. (2020), comprovaram este fato, quando,

em suas pesquisas, utilizaram lâminas de *Hevea brasiliensis* para produção dos painéis LVL e evidenciando a viabilidade da espécie e ainda salientando o uso adequado de tais painéis em degraus de escadas, pisos, vigas em “I” e pontes.

É possível também, combinar lâminas de diferentes espécies para a formação de um mesmo painel como fez Lima et al. (2013), em estudo sobre as propriedades físico-mecânicas de painéis LVL de três espécies amazônica (*Cordia goeldiana* Huber., *Parkia gigantocarpa* Ducke e *Brosimum parinarioides* Ducke), assim como, combinações de lâminas das espécies entre si e combinações com *Pinus oocarpa* de um plantio experimental. Os autores observaram maior resistência a absorção de água e maior módulo de ruptura em painéis LVL compostos apenas das espécies Amazônicas.

Apesar da produção dos painéis LVL ser similar à do painel compensado, o que difere os dois está na disposição de suas lâminas. As lâminas dos painéis compensados são sobrepostas e cruzada, enquanto em painéis LVL, são dispostas na mesma direção (ABIMCI, 2009). Essa ordenação de lâminas, pode conferir maior resistência aos painéis LVL. Comprovando isso, Santos (2015) comparou propriedades físicas e mecânicas de painéis LVL e compensado, onde os painéis LVL apresentaram maior módulo de ruptura e maior módulo de elasticidade, além da maior resistência na linha de cola em testes de cisalhamento.

A Figura 1 traz uma representação da diferença de configuração entre as lâminas de painéis LVL e compensados.

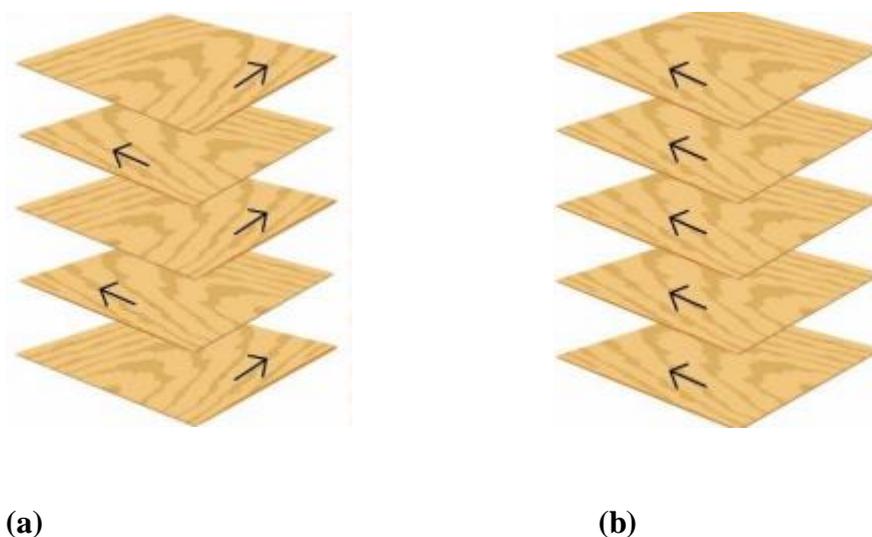


Figura 1: Representação da disposição de lâminas em painéis: (a) painel compensado; (b) painel LVL. (Fonte: COSTA et al., 2020).

Na mesma linha de pesquisa, Mendonza et al. (2017) realizaram estudos comparativos entre os dois tipos de painéis, formados com a mesma quantidade de lâminas e colados com resina a base de fenol formaldeído. Com isso, evidenciaram a superioridade dos painéis LVL sobre os compensados, obtendo maior resposta ao esforço de flexão quando a orientação do ensaio era paralelo às fibras. Porém, menor resposta ao esforço de flexão, quando submetidos a ensaios perpendiculares às fibras.

Um dos principais componentes na produção de painéis de madeira são os adesivos. Fiorelli (2002) traz a definição de adesivos como substâncias capazes de proporcionar a união entre materiais através do contato entre as suas superfícies. Segundo o autor, os adesivos podem ser divididos em inorgânicos e orgânicos. Os inorgânicos conforme citado por Campos e Lahr (2004), são aqueles a base de silicatos solúveis ou cerâmicas. Esses adesivos agem através da desidratação do solvente, proporcionando ao material, maior resistência mecânica entre suas ligações.

Já os orgânicos podem ser subdivididos em naturais ou sintéticos. Os adesivos orgânicos do tipo naturais, são aqueles de base animal ou vegetal, como taninos, gomas naturais, celulose, amido, etc. (FIORELLI, 2002). Os do tipo sintéticos, são aqueles bastante utilizados em indústrias madeireiras, devido a sua resistência a água e a microrganismos. Entre os principais adesivos sintético estão: ureia-formaldeído (UF), fenol-formaldeído (FF), melamina-formaldeído (MF) e o resorcinol-formaldeído (RF) (CAMPOS; LAHR, 2004; IWAKIRI, 2005).

A UF é um adesivo de baixo custo, incolor e solúvel em água, que apresenta cura em baixas temperaturas, possuindo alta resistência a micro-organismos e à abrasão, além de ser de fácil manipulação e variedade de condições de cura (CONNER, 1996). Conforme Iwakiri et al. (2005), é um adesivo bastante utilizado na confecção de painéis aglomerados. Quanto as suas desvantagens, destaca-se a emissão de formaldeído. Na prensagem a quente de painéis colados com UF, o formaldeído é liberado pela degradação dos grupos metiol presentes no UF, ficando aprisionado e sendo liberado de forma lenta (YOUNG NO; KIM, 2007) Esse processo, torna o adesivo tóxico, sendo prejudicial ao meio ambiente e a saúde. Além disso, o adesivo possui algumas propriedades como baixa resistência mecânica e baixa durabilidade em contato com ambientes de extrema umidade (FERREIRA, 2017).

Uma opção de adesivo a base de UF que emite menor emissão de formaldeído, é a melamina-ureia-formaldeído (MUF). O MUF é um adesivo obtido através da modificação do UF com a adição de melamina. Isso é possível, devido à similaridade de suas estruturas moleculares. É um adesivo que proporciona melhores propriedades de durabilidade e maior resistência à umidade, por isso é utilizado em aplicações estruturais (HSE, 2009). A melamina possui alto custo e ao ser adicionada ao UF, além de elevar o custo do adesivo, tende a modificar suas características, principalmente referentes a sua reatividade. Com isso, a adição de melamina é otimizada, para minimizar o custo do adesivo e maximizar a resistência a umidade (ANGELATOS et al. 2004).

Os adesivos de base MF, são os mais indicados em aplicações para áreas externas por serem resistentes a umidade. Uma de suas principais vantagens é a cura sem necessidade de catalizador, apenas cura a quente. Já entre as desvantagens estão: alto custo, devido a melamina; emissões de formaldeído, devido a exposição a umidade que causa a quebra de ligações da resina; e vida útil curta, caso diluído em soluções aquosas, por ser comercializado em forma de pó (CAMPOS; LAHR, 2004; IWAKIRI et al. 2005).

O FF é um adesivo bastante utilizado na indústria de chapas e painéis de madeira, principalmente em compensados, painéis de fibra dura (hardboard), aglomerados e OSB. Assim como a ureia-formaldeído, é um adesivo consideravelmente tóxico, porém possui maior resistência quando utilizado em ambientes úmidos e áreas externas. É um adesivo que tem cura em meios alcalinos, logo, madeiras de maior acidez, apresentam dificuldade de colagem. Além disso, uma outra desvantagem é o seu alto custo, sendo considerado até 2,5 vezes mais caro que a UF (SANTOS, 2016).

Os adesivos de base RF, são mais resistentes a intemperes, umidade e ao calor, por isso, podem ser utilizados tanto em áreas internas como externas. É um adesivo que possui cura a temperatura ambiente. O resorcinol, assim como o fenol, são subprodutos obtidos através da oxidação do benzeno. Assim como o FF, os adesivos RF possuem a desvantagem do seu alto custo (AZEVEDO, 2009; SULAIMAN et al. 2009; SANTOS, 2012).

4.2 Ácido Cítrico: potenciais utilização na indústria madeireira

O ácido cítrico (AC) é um ácido tricarbóxico encontrado na maioria das frutas cítricas como em laranjas e limões, que apresenta fórmula molecular $C_6H_8O_7$, e fórmula estrutural representada na Figura 2 (FIORUCCI et al., 2002). O AC pode existir em sua forma anidra, um pó branco cristalino ou granulado, possuindo cristalização em altas temperatura quando incorporado em soluções líquidas, ou monohidratado, possuindo cristalização em água fria, quando exposto a temperaturas inferiores a $36,6^\circ C$ (FIB, 2014; MUÑOZ-VILLA, 2014).

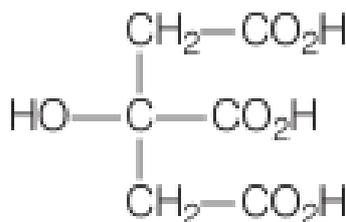


Figura 2. Fórmula estrutural do Ácido Cítrico
Fonte: FIORUCCI et al., 2002

Inicialmente, o AC era obtido pela extração e purificação de frutas cítricas na Itália e na Sicília, as quais, tinham o monopólio de produção e com isso, elevavam o preço do produto. Atualmente, a obtenção do ácido cítrico comercializável mundialmente, é feita pela fermentação da sacarose por processos de biossínteses, nos quais o fungo *Aspergillus niger* é utilizado. O processo pode ocorrer em superfície, onde micélios do fungo crescem em superfície do meio de cultura em condição estática, podendo ser recolhido, ou por fermentação submersa, onde o fungo cresce totalmente submerso e em agitação, para que possa se distribuir e crescer de forma homogênea no meio de cultura (CARVALHO et al 2005; FIB, 2014).

O AC tem variado potencial de utilização, entre eles estão as indústrias alimentícias, que detém 70% da produção mundial. Esse alto consumo está relacionado as suas propriedades antioxidantes, acidulantes, flavorizantes, sequestrantes e reguladoras de acidez para alimentos diversos como em refrigerantes, xaropes, geleias, doces, vinhos, processamento de queijos, emulsificante em sorvetes, etc. Cerca de 12% da produção mundial de AC são voltados a indústria farmacêutica, em usos como anticoagulante para bancos de sangue, pastilhas e pó efervescentes. E os 18% restantes, são consumidos em outras indústrias (ROJAS et al., 2008; FIB, 2014).

Na agricultura o AC pode ser utilizado no solo para potencialização da disponibilidade de nutrientes, como por exemplo o fosforo, que atua no desenvolvimento das plantas. Lemos (2015) avaliou a viabilidade da aplicação de doses de AC em solos intemperizados para o desenvolvimento de mudas de cafeeiro. Com a aplicação dessas doses de AC, o autor observou que esses solos restabeleceram bases, sem alteração do pH. Além disso, o AC possibilitou a disponibilidade de fosforo para as mudas, que se desenvolveram e possuíram alta produtividade de grãos.

No setor florestal, o AC vem ganhando espaço como bioadesivo para fabricação de painéis, por ser considerado uma alternativa ambiental e econômica aos adesivos sintéticos. O primeiro estudo com utilização do ácido cítrico como adesivo, foi o de Umemura et al., (2012a), onde os pesquisadores buscavam investigar o uso do AC como adesivo natural em colagem de moldes feitos com pó de casca de acácia (*Acacia mangium*). Os moldes contendo 20% em peso de AC e prensados a quente por 180°C por 10 minutos foram os que obtiveram ótimos valores para as propriedades mecânicas de módulo de ruptura (f_m) e módulo de elasticidade (E_M), com 18,1 e 4900 MPa, respectivamente. Acima do teor de 20%, os valores para essas propriedades tornaram-se inferiores, e abaixo de 20%, os moldes não possuíram nenhuma força de ligação.

Ainda na pesquisa, através da espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), foi possível comprovar a existência de adesão por ligação química, devido a formação de ligação éster entre os grupos carboxilas derivados do ácido cítrico e os grupos hidroxilas da casca da madeira de acácia (Figura 3). Dessa forma, a aplicação de ácido cítrico como adesivo natural em moldes feitos com pó de casca de madeira foi considerada viável (UMEMURA et al., 2012a).

No mesmo ano, Umemura et al., (2012b) resolveram investigar a possibilidade de utilização do AC como adesivo de madeira, utilizando a madeira da acácia (*Acacia mangium*) para fabricação de moldes. Nos moldes com excelentes valores de propriedades mecânicas foram utilizados um teor de 20% de AC, prensagem a quente de 200°C e pressão de 4 MPa por 10 minutos. O valor de f_m para esses moldes foi de 35,8 MPa, e o E_M foi de 5400 MPa. Já as propriedades físicas de absorção de água (AA) e inchamento em espessura (IE), obtiveram valores aproximados de 6% e 8%, respectivamente. Os autores constataram uma correlação positiva entre o teor de ácido

cítrico e a resistência a água, onde o aumento no teor de AC proporcionava maior resistência desses moldes a água.

A existência de ligações químicas devido as ligações éster formada entre os grupos hidroxilas da madeira de acácia e os grupos carboxilas do ácido cítrico foi comprovada pela utilização de FTIR, dessa forma, o AC apresentou excelentes propriedades adesivas que permitem a sua utilização na fabricação de moldes a base de madeira (UMEMURA et al., 2012b). O mecanismo de reação de formação de ligação éster, é mostrado na Figura 3.

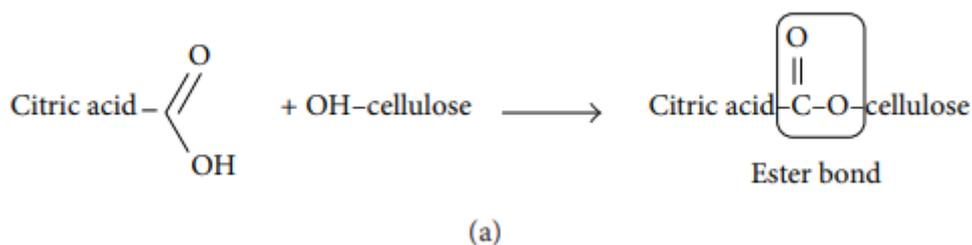


Figura 3: Mecanismo de reação de formação de ligação éster entre ácido cítrico e madeira.
Fonte: Romainor et al., (2014)

Visando a fabricação de painéis aglomerados utilizando AC, Umemura et al., (2013) consideraram adicionar sacarose à mistura adesiva, com intuito de melhoria do desempenho das ligações. Utilizando diferentes proporções de ácido cítrico e sacarose os autores chegando à proporção ideal de mistura de 25/75 (AC/S) com teor de sólidos de resina de 30% em peso e prensagem de 200°C por 10 minutos. Dessa forma, foi possível obter valores médios para propriedades mecânicas que se encaixaram com a norma JIS A 5908 (2007) referente a uso em construções. Além disso, foi observado nesses painéis, uma boa resistência a água e menores valores de inchamento em espessura, o que influenciou na sua adesão.

Em um estudo similar, considerando a proporção ideal AC/S de 25/75, Umemura et al. (2014) testaram os efeitos da densidade do painel de aglomerado e da temperatura da prensa em suas propriedades. A temperatura de prensagem ideal ocorreu a 200°C por 10 minutos, resultando em painéis de excelentes propriedades de flexão, inchamento em espessura e absorção de água. Os painéis com densidade de 0,8 g/cm³ foram considerados ótimos, com valores de propriedades mecânicas que atenderam as normas da JIS A 5908 (2007).

A estabilidade dimensional da madeira ou produtos oriundo da mesma, tem uma íntima ligação com as hemiceluloses, compostas de grupos hidroxilas alifáticos, ou seja, que tem afinidade com a água. Desta forma, em temperaturas na faixas de 200°C a 300°C, esses grupos são reduzidos e a parede celular da madeira, tende a absorver menos água, o que proporciona maior estabilidade dimensional, reduzindo o inchamento em espessura (DIETENBERGER; HASBURGH, 2016; GÉRARDIN, 2016).

Outro fator que explica os excelentes valores nas propriedades de resistência a flexão nos painéis, é o ponto de transição vítrea da lignina. Conforme Salmen, 1982, a transição vítrea da lignina, ou amolecimento, ocorre em temperaturas entre 150°C a 200°C. Dessa forma, quando o material é resfriado, adquire rigidez, ou seja, melhores propriedades mecânicas ao material.

Widyorini et al. (2016a), avaliaram a capacidade de colagem de painéis aglomerados com diferentes composições de ácido cítrico e sacarose. Os autores utilizaram partículas de madeira de teca pulverizadas com 10% de AC, prensadas a 180°C e 200°C por 10 minutos sob pressão de 3 MPa. Um dos fatores importantes observados nessa pesquisa, foi a formação éster que aconteceu pela reação de grupos carboxilas e hidroxilas influenciados pelo aumento da temperatura de prensagem. O aumento da temperatura de prensagem favoreceu a redução dos valores de absorção de água e inchamento em espessura, o que resultou na melhora da estabilidade dimensional dos painéis. Outro fator importante, foi a relação ácido cítrico/sacarose. Painéis que continham apenas ácido cítrico foram os que obtiveram maiores valores de resistência a flexão.

As condições ideais para painéis de aglomerado de partículas de teca no estudo, foram prensagem a 200°C com relação ácido AC/S de 100/0. Onde foram adquiridas propriedades físicas e mecânicas excelentes, com isso atendendo os requisitos da JIS A 5908 (2007) para valores de f_m e E_M superiores a 8 e 2000 MPa respectivamente (WIDYORINI et al 2016a).

Devido as excelentes propriedades adquiridas pela utilização do ácido cítrico como adesivo em painéis de partículas de madeira, alguns pesquisadores testaram o potencial de colagem desse adesivo na fabricação de painéis de partículas de diferentes biomassas.

Kusumah et al. (2016) utilizaram bagaço do sorgo sacarino colado com AC na fabricação de painéis particulados. Nessa pesquisa, os autores pulverizaram as partículas com diferentes teores de AC e após isso, realizaram uma pré-secagem dessas partículas, a fim de observar o efeito do teor de umidade nas propriedades físicas dos painéis. Com isso, os painéis compostos de partículas pré-secas foram considerados superiores aos painéis sem esse tratamento. Com o aumento do teor de AC, foi observada uma melhoria nas propriedades mecânicas dos painéis. Houve, também, melhoria das propriedades físicas ocasionada pelo aumento da temperatura de prensagem.

Widyorini et al (2016b), constataram um aumento significativo na estabilidade dimensional de painéis produzidos com partículas de bambu e colados com AC. A pesquisa tinha como objetivo, avaliar as propriedades físicas e mecânicas de painéis de partículas de bambu. Para fabricação dos painéis, os autores utilizaram partículas de três diferentes espécies de bambu (*Dendrocalamus asper*, *Gigantochloa atroviolacea* e *Gigantochloa apus*) pulverizadas com 15% e 30% em peso de teor AC e prensadas a 180°C por 10 minutos a uma pressão de 3MPa.

Os autores verificaram que as partículas das diferentes espécies, não afetaram significativamente as propriedades mecânicas dos painéis. Quanto ao AC, conforme o aumento do seu teor nos painéis, foi observado uma melhoria da estabilidade dimensional, resultado da redução nos valores das propriedades físicas de inchamento e absorção de água. Além disso, houve um aumento nos valores das propriedades mecânicas de flexão estática, promovendo resistência e adequando esses painéis ao padrão industrial Japonês de painéis de partículas JIS A 5908 (2007) (WIDYORINI et al. 2016b).

Widyorini et al (2017) investigaram o efeito da adição de amido em aglomerados de bambu Petung (*Dendrocalamus sp.*) fabricados com ácido cítrico. Nesse estudo, além do AC, os autores utilizaram três tipos de amidos (milho, *Canna edulis* Ker-Gawl e *Maranta arundinacea* L.) em diferentes composições. Como resultado do estudo, os painéis de partículas de bambu com AC/A, adquiriram boa estabilidade dimensional e apresentaram propriedades mecânicas superiores aos que continham apenas AC como ligante, isso, devido as excelentes propriedades de ligações advindas dos grupos hidroxilas dos amidos que se reticulavam com o AC. Além disso, propriedades mecânicas superiores foram notadas em resinas que continham amido de *Canna* e *Maranta* em relação ao amido de milho. Condições ótimas para fabricação de painéis de partículas de

bambu, foram obtidas com a adição de 12,5% em peso de amido de *Maranta* (WIDYORINI et al., 2017).

Nakamura (2018) testou parâmetros de produção para painéis aglomerados de coco-da-baía e ácido cítrico como adesivo. A autora utilizou estudos exploratórios para determinação dos parâmetros, além de analisar o efeito do AC sobre as propriedades físico-químicas, e por fim, testou a influência do AC sobre a resistência dos painéis a deterioração. A utilização do AC nos painéis, resultou em maior resistência a água, proporcionando maior estabilidade dimensional. Dentre os testes, os melhores parâmetros para fabricação dos painéis foram alcançados a temperatura de prensagem a 185°C em painéis compostos por fibras de menor comprimento.

A fabricação de painéis compostos de coco-da-baía com teor de 18% em peso de AC e densidade 0,89 g/cm³, atendeu aos parâmetros da norma da ABNT 14810-2 (2006), para painéis P2 (uso não estrutural em ambientes secos). Quanto a resistência a deteriorações, a aplicação de AC resultou na proteção dos painéis ao ataque dos fungos *G. trabeum* e *T. versicolor*, reduzindo a perda de massa causada pelos fungos da podridão branca (NAKAMURA, 2018).

Ngadianto et al. (2018) desenvolveram em suas pesquisas, painéis aglomerados com densidade de 0,8 g/cm³, compostos de casca de amendoim e diferentes teores de AC. Os autores conseguiram fabricar painéis com excelentes propriedades, principalmente relacionadas ao inchamento em espessura, que sofreu uma redução conforme o aumento do tempo de prensagem. Esses painéis adquiriram maior resistência a cupins de madeira seca e maior mortalidade dos mesmos, quando prensados por 10 minutos com teor de AC de 30% em peso.

Além do ácido cítrico ser utilizado na colagem de partículas diversas em painéis aglomerados, ele possui potencial uso em painéis laminados a base de madeira como os compensados e o LVL.

A primeira utilização do AC como bioadesivo em colagem de lâminas de madeira para LVL foi avaliada por Del Menezzi et al, (2018), onde os autores buscaram esclarecer a um nível químico, a atuação do AC na colagem de madeira em temperaturas de curas já conhecidas em colagem de painéis de madeira. Os autores utilizaram lâminas de madeira de álamo (*Populus* sp.), pulverizadas com uma solução de AC/água (50:50) e

secas em estufa a 60°C por 6 horas. Após a secagem e montado o painel LVL, o mesmo foi prensado a uma temperatura de 180°C com programação de prensagem de 4 etapas: 1,5 MPa por 5 min; 3,0 MPa por 10 min; 1,5 MPa por 2,30 min e 0,5 MPa por 2,30 min.

Os autores conseguiram demonstrar que não só houve reação entre ácido cítrico e a lignina, como entre o ácido cítrico e os carboidratos constituintes da madeira. Essas reações aconteceram por esterificações entre os grupos carboxílicos do AC e os grupos hidroxilas aromáticos e alifáticos da madeira. Aliado a isso, ocorreram as ligações ésteres com rearranjos de lignina, devido a esterificação por reações do AC com glicose e oligômeros lineares e ramificadas que favorecem melhorias na resistência à água, notáveis em pesquisas anteriores. Dessa forma, os autores comprovaram que o AC tem potencial adesivo para colagem de lâminas de madeira para obtenção de painéis LVL (DEL MENEZZI et al., 2018).

Mendes (2021), utilizou dados inéditos da pesquisa do pós-doutorado de Del Menezzi (2018) e estudou o potencial de uso do AC na colagem de painéis LVL através da análise dos resultados de propriedades físicas e mecânica. A autora analisou resultados de pré-testes, submetidos a diferentes teores de AC em uma programação de prensagem com pressões e tempos variáveis. Desta forma, foi possível concluir que a programação de prensagem ideal para painéis de LVL, foi encontrada em temperatura de 180°C e com aplicação do teor de 10% de AC, onde os painéis apresentaram as melhores propriedades físicas e propriedades mecânicas superiores ou semelhantes aos encontrados na literatura (MENDES, 2021).

Zhao et al. (2019) investigaram as condições ótimas de prensagem e o comportamento de cura do adesivo Sacarose-ácido cítrico (SC) em colagem de compensados de *Populus tomentosa* Carr. Em temperatura de prensagem a 190°C os painéis com SC obtiveram cura adesiva suficiente. Em 7 minutos de prensagem, o compensado obteve um excelente valor de resistência ao cisalhamento úmido de 0,99 MPa, sendo considerado esse, o tempo ideal de prensagem.

O comportamento de cura do adesivo SC, foi investigado por análises térmicas, que mostraram menores degradações térmicas e reações endodérmicas do adesivo SC nas proporções 25/75 se comprados ao teor de sacarose e o ácido cítrico individualmente. Na análise espectrométrica foi possível comprovar que o adesivo SC foi curado pela reação

entre compostos de furano, sacarídeos e o AC, com o polímero resultante similar aos unido por ligações éster (ZHAO et al., 2019).

Assim como Widyorini et al (2017) utilizaram uma solução de amido e ácido cítrico em aglomerados de bambu, Kusumah et al., (2020) investigaram a possibilidade de utilização da solução em compensados de madeira de *Paraserianthes falcataria*. Na pesquisa, os autores estudaram o efeito da composição de AC/A, além das propriedades físicas e mecânicas do compensado. Nas proporções de composição AC/A de 50:50, houve maior resistência ao cisalhamento, e a menor delaminação de lâminas do compensado. Isso atribuído ao fato de o amido atuar como enchimento no adesivo, resultando em boa qualidade de colagem. O compensado adquiriu boas propriedades físicas e mecânicas devido à forte interação química entre os grupos hidroxila dos compostos químicos da madeira com os grupos carboxilas do AC e o carbono anomérico da dextrina, composto derivado do amido (KUSUMAH et al., 2020).

Em pesquisas atuais, Sutiawan et al., (2021) estudaram o efeito do tempo de prensagem e da temperatura nas propriedades físicas e mecânicas de painéis compensados de madeira de jabão branco (*Anthocephalus cadamba* Miq.) colados com AC. Os autores concluíram que a faixa de temperatura e tempos considerados ideais foram em 190°C por 10 minutos, pois nela, os painéis apresentaram menor delaminação e maior resistência ao cisalhamento, além da estabilidade dimensional adquirida pela resistência a água.

5. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste trabalho foram dados inéditos, obtidos a partir do estudo em pré-testes de Del Menezzi et al. (2022). A metodologia utilizada pelos autores nos testes exploratórios foi considerada no presente estudo, levando-se em conta temperatura (180°C), quantidade de AC (10% com base no peso das lâminas) e tempo de prensagem (20 min.). Além disso, foi escolhido o melhor esquema de prensagem para reprodução de sua metodologia em três diferentes tratamentos: painéis colados exclusivamente com ácido cítrico (T1), painéis colados com ácido cítrico e melamina-ureia formaldeído (MUF)(T2) e painéis colados exclusivamente com MUF (T3). Para cada tratamento, foi realizada cinco repetições.

Para a confecção dos painéis, foram utilizadas dez lâminas de madeira de *Pinus taeda*, com dimensão de 400 mm x 400 mm e espessura de 2-3 mm. Para painéis utilizando ácido cítrico como adesivo, uma solução de AC/água (1:1) foi pulverizada sobre a superfície das lâminas destes, até que fosse obtida uma solução com gramatura de 134 g/m², formando assim, uma linha de cola simples. As lâminas foram então dispostas em estufa onde foram secas a 60°C por 6 horas. A montagem dos painéis foi efetuada através da colagem entre a superfície de lâminas com a solução adesiva e a superfície oposta de lâminas sem o adesivo. Os painéis formados, apresentaram dimensões: 400 mm x 20 mm x 20,5 mm.

A resina MUF foi preparada em laboratório seguindo algumas etapas, conforme Del Menezzi et al. (2022):

Foram colocados em um béquer: 300 g de formaldeído (37% de água), seu pH foi ajustado para 9. Então foi adicionado a primeira carga de uréia (74 g) e melamina (20 g), com isso, a temperatura foi elevada a 90°C. Ao atingir 90°C, o pH da solução foi novamente ajustado para 5-5,5 e mantido por 40 minutos. Após isso, o pH foi ajustado para 8,5 e a segunda carga de melamina (63 g) foi adicionada e a reação mantida por 60 minutos. Em seguida, a temperatura da solução foi reduzida para 60°C, seu pH ajustado para 8 e assim foi adicionada a segunda carga de uréia (19,59 g) e a reação foi mantida por mais 20 minutos. Por fim, a resina foi resfriada em gelo e mantida em refrigerador, até o momento de ser utilizada.

A Tabela 1 apresenta detalhadamente os três diferentes tratamentos dos painéis LVL. O T1 era composto por 10% de AC, com base no peso das lâminas, e foi submetido a quatro etapas de prensagem com pressão variável. Inicialmente, sendo submetido a uma pressão inferior de 1 MPa por 5 minutos, aumentando a pressão para 2,5 MPa por 10 minutos na segunda etapa, reduzindo mais uma vez para 1 MPa por 2 minutos e 30 segundos na terceira etapa e finalizando a quarta etapa com pressão de 0,5 MPa por 2 minutos e 30 segundos. O painel T2 era composto por 100 g/m² de resina MUF e 10% de ácido cítrico e também foi submetido a quatro etapas de prensagem e mesmo tempo, similares ao painel do T1. Já o T3, era composto por 100 g/m² de resina e apenas uma etapa, a inicial, com pressão contínua de 1,5 MPa por 20 minutos, não sendo necessário a utilização de mais etapas de prensagem. Todos foram prensados a 180°C. Essas etapas foram realizadas em laboratório com auxílio do equipamento o *Joos Lap 150* (Pfalzgrafenweiler, Alemanha) que pode ser observado na Figura 4.



(a)

(b)

Figura 4 - Equipamento de Prensagem *Joos Lap 150*; (a) Prensa; (B) monitor da prensa.

Tabela 1 – Procedimento de prensagem para os três tratamentos

Tratamentos	Resinas	Gramatura g/m ²	AC %	Etapas	1°	2°	3°	4°
					Etapa	Etapa	Etapa	Etapa
MPa								
T1	-	-	10	4	1	2,5	1	0,5
T2	Sim	100	10	4	1	2,5	1	0,5
T3	Sim	100	-	1	1,5	-	-	-

T1: Tratamento com ácido cítrico; T2: Tratamento com ácido cítrico e Melamina-Ureia-Formaldeído; T3: Tratamento com Melamina-Ureia-Formaldeído; Resina: Melamina-Ureia-Formaldeído; Gramatura: quantidade de resina por m²; AC: Ácido cítrico; MPa: Megapascal.

A avaliação das propriedades de flexão, módulo de ruptura (f_m), módulo de elasticidade (E_M) e resistência a compressão paralela à grã ($f_{C,0}$), foi realizada na máquina de ensaios universal INSTRON 4467, seguindo as normas EN408 - A1 (2012). As dimensões dos corpos-de-prova (CP) foram de 25 mm de largura e comprimento seis vezes maior que a espessura do painel. A avaliação da qualidade de colagem foi realizada através da avaliação da resistência ao cisalhamento da linha de cola ($f_{gv,0}$), em condições secas, conforme a norma EN314-1 (2004) e a avaliação da qualidade de ligação, conforme a norma EN314-2 (2004). Os testes de inchamento em espessura (IE) e absorção de água (AA), obedeceram aos critérios da norma ASTM D1037 (2009), com alterações nas dimensões das amostras para 25 mm x 25 mm x espessura. Os CPs foram imersos em água e após 2 e 24 horas, foram medidos e pesados.

Os dados obtidos para as propriedades mecânicas e as propriedades físicas, foram tabulados em banco de dados do Excel, então, foi realizada a análise descritiva. O teste de normalidade de dados dos diferentes tratamentos foi feito através do teste de Shapiro-Wilker. Em seguida, foi realizado o teste de análise de variância (ANOVA) para comparação entre os grupos dos diferentes tratamentos, uma vez ocorrendo diferença estatística, o teste de Tukey foi realizado para identificar essas diferenças. Todas as análises estatísticas foram feitas através do programa estatístico JAMOVI, versão 2.2. Foi considerado um nível de significância de 5%.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Propriedades físicas

Os valores médios das porcentagens de absorção de água e inchamento em espessura dos painéis para cada tratamento, são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios de absorção de água (AA) e inchamento em espessura (IE), 2 e 24 horas.

Tratamento	AA (%)		IE (%)	
	2h	24h	2h	24h
T1	55,8 a	63,5 a	16,8 a	19,1 a
T2	34,0 b	50,8 b	13,1 a	16,9 a
T3	40,9 b	56,8 b	12,2 a	15,4 a

*Valores em uma mesma coluna seguidos, por uma mesma letra, são idênticos estatisticamente. AA – Absorção de água; IE – Inchamento em espessura; T1 – painel LVL com ácido cítrico; T2 – painel LVL com ácido cítrico e MUF; T3 – painel LVL com MUF.

Após 2 horas de imersão, a maior porcentagem média de absorção de água, foi observada nos painéis LVL do tratamento 1 (55,8%). Houve diferença estatística significativa ($p < 0,05$) entre os painéis T1 e os dois outros, T2 e T3. Os painéis T2 e T3 não diferiram entre si. Após 24 horas de imersão, os painéis T1 apresentaram maior valor médio de absorção de água de 63,5%, e os painéis T2, valor médio de absorção de água de 50,8%, existindo diferença significativa ($p < 0,05$) entre os dois, assim como, houve diferença significativa entre os painéis do tratamento 1 e os do tratamento 3. Não houve diferença significativa entre T2 e T3. A figura 5 mostra a porcentagem de absorção de água em imersão por 2 e 24 horas, para os diferentes tratamentos.

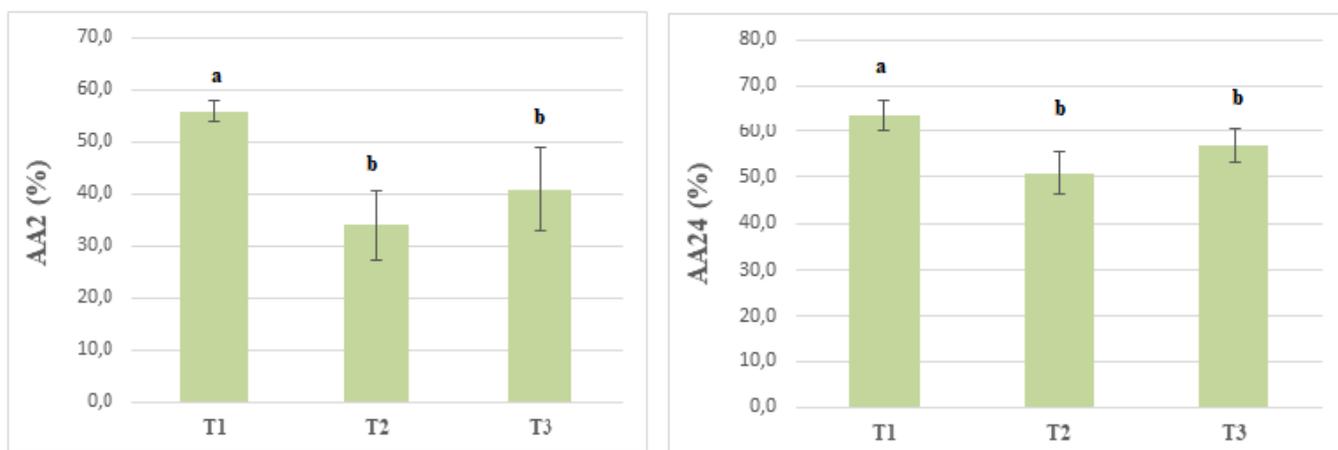


Figura 5 – Absorção de água após imersão por 2 e 24 horas do LVL para diferentes tratamentos. AA2(%) - Porcentagem de absorção de água em imersão por 2 horas; AA24(%) – Porcentagem de absorção de água em imersão por 24 horas; T1 – painel LVL com ácido cítrico; T2 – painel LVL com ácido cítrico e MUF; T3 – painel LVL com MUF.

Alguns dos fatores que podem explicar a absorção de água em painéis é o tipo de adesivo e a densidade da espécie utilizada para fabricação. Os adesivos atuam como bloqueadores no sítios de adsorção de água dos painéis. Os painéis com adesivos

sintéticos, absorvem menos água que os painéis com AC. O adesivo MUF possui alta resistência a água, devido a adição da melamina, que fortalece a resina UF da hidrólise.

A densidade da madeira é inversamente proporcional a sua permeabilidade densidade. Logo, quanto maior a densidade da madeira, menor a permeabilidade, com isso, menor a absorção de água. A espécie utilizada para confecção das lâminas de LVL para os painéis do presente trabalho, o *Pinus taeda*, que tem densidade básica próximo a 0,470 g/cm³. Este valor de densidade é consideravelmente baixo, fator que contribui para a absorção de água nestes painéis.

Setter et al. (2021) comprovaram a influência da densidade nas propriedades de absorção de água, quando estudaram o desempenho de compensados em diferentes espécies e adesivos. Os autores observaram maior absorção de água em painéis compensados de paricá (*Schizolobium amazonicum* Herb) (82,84%) que tinham densidade de 0,39 g/cm³, já os menores valores para absorção de água, foi encontrado em painéis compensados de pinus (*Pinus oocarpa*) (67,36%) que tinham densidade 0,55 g/cm³, sendo os painéis das duas espécies colados com o mesmo tipo de adesivo FF.

Bal (2016), em um estudo, produziu painéis LVL com lâminas de um clone de Álamo (*Populus x euramericana* I-214) e painéis com lâminas de eucalipto (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden), os dois colados com FF. Encontrando valor médio para absorção de água após 24 horas de 59,56% nos painéis de álamo, valor inferior ao encontrado nesse trabalho para os painéis T1 (63,5%), e superior para o painel T2 (50,8%) e o painel T3 (56,8%). Possivelmente, essa diferença ocorreu em função dos diferentes adesivos. O FF, apresenta maior resistência a umidade, se comparado ao ácido cítrico. Porém, o MUF ainda mostra-se superior aos dois adesivos. Quanto aos painéis com lâminas de eucalipto, o autor encontrou valor médio de absorção de água de 23,23%, sendo inferior aos resultados deste trabalho para todos os tratamento. Fato este, explicado pela menor porosidade da madeira de eucalipto, devido a sua alta densidade, o que reduz a absorção de água.

Mendonza et al (2017) encontraram valor médio de absorção de água de 68,2% em painéis LVL, compostos por lâminas de amescla (*Trattinnickia burserifolia* (Mart.) Willd) colados com FF, o que foi superior aos valores encontrados nesse trabalho para todos os tratamentos. Um fator que pode ter influenciado a absorção de água, além dos diferentes adesivos, foi a densidade das espécies. Apesar do pinus e da amescla

apresentarem densidade baixa, leva-se em conta, o de menor densidade, pela maior quantidade de poros. A amescla apresenta densidade próxima a $0,44 \text{ g/m}^3$, isso implica na maior absorção de água em relação ao pinus, com densidade $0,47 \text{ g/m}^3$

Costa et al. (2020) produziram compensados com lâminas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke), coladas com UF. Os autores encontraram valores médios de absorção de água de 71,75%, sendo superior aos valores encontrados no presente trabalho para todos os tratamentos. Além dos diferentes tipos de painéis, essa absorção de água, superior aos três tratamentos do presente trabalho, deve-se levar em conta os diferentes adesivos. O UF, é um adesivo que não possui boa resistência a água, não sendo indicado para usos em exposição de extrema umidade, diferente do MUF.

Sutiawan et al. (2021), encontraram valores de absorção de água de 83,13%, em um estudo onde produziu painéis compensados de lâminas de jabon branco (*Anthocephalus cadamba* Miq) com AC, taxa de espalhamento de 134 g/m^2 , temperatura de 180°C e pressão de 1,3 MPa. O valor encontrado é superior aos encontrados neste trabalho para todos os três tratamentos. Essa diferença de absorção de água pode ser explicada pelos diferentes produtos (compensados e LVL), devido à disposição das lâminas, se comparados ao T1 (63,5%) e pelos diferentes tipos de adesivo, se comparados ao T2 (50,8%) e T3 (56,8%).

Os três tratamentos não diferiram estatisticamente quanto ao inchamento em espessura por 2 horas de imersão em água, apresentando valores com variação média entre 12,2% a 16,8%. Para o inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água, também não houve diferença estatisticamente significativa entre os painéis LVL dos três tratamentos, com variação média de 15,4% a 19,1%.

O comportamento dos três painéis ao inchamento em espessura, pode ser explicado por Del Menezzi (2004) quando cita dois fatores que influenciam a estabilidade dimensional em painéis: a adsorção de água e a liberação das tensões de prensagens. A adsorção de água acontece pela atração das moléculas de água aos sítios de hidrogênio presentes na parede celular, fazendo com que essas moléculas ocupem esses espaços. No momento em que esses espaços são preenchidos por algum tipo de adesivo, ocorre a redução desses sítios. No presente trabalho, o fator que pode ter ocorrido, foi o preenchimento dos espaços vazios pelos adesivos, ocasionando uma menor adsorção de água.

Outro fator importante, é a liberação de tensões de prensagem. A força de prensagem aplicada nos painéis durante a fabricação, geram tensões internas, que são liberadas logo após, na presença de umidade. Dessa forma, os painéis adquirem maiores valores de inchamento em espessura e maior instabilidade dimensional. (DEL MENEZZI, 2004). Para painéis laminados, as forças de prensagem são menores, pois a adesão desses painéis é feita facilmente pelo contato entre o adesivo e as lâminas. Com isso, as tensões liberadas em umidade são menores e o inchamento é menor.

Mendonza et al. (2017) submetem painéis compensados e LVL de amescla (*Trattinnickia burserifolia*) colados com FF, à prensagem em 120°C por 10,5 minutos numa pressão 2,8 MPa. Para aplicação do adesivo nas lâminas, os autores utilizaram uma passadeira de cola do tipo rolo e adotaram uma gramatura de 280 g/m². Com isso, o resultado médio para inchamento em espessura dos painéis LVL foi de 5,5%, já para os painéis compensados foi de 25,1%. Resultados inferiores aos encontrados no presente trabalho. Isso pode ser atribuído a alguns fatores como a diferença de espécies, os diferentes produtos, o tipo de adesivo e sua gramatura.

As diferentes espécies influenciam a penetração da quantidade de adesivo. Sendo a amescla de menor densidade, se comparada ao pinus do presente trabalho. Logo, em menor densidade, ocorrerá maior absorção adesiva. Quanto ao tipo de produto, conforme Del Menezzi (2004), os painéis compensados, devido a orientação de suas lâminas de forma perpendicular, resultam em limitações no inchamento em espessura. Os diferentes adesivos utilizados nos dois trabalhos também limitam o inchamento em espessura através da adesão das lâminas. Porém, o fator de maior diferenciação para os valores médios de inchamento para os dois trabalhos, foi a gramatura utilizada. No presente trabalho, foi utilizado gramatura de 134 g/m² de AC e para MUF, foi utilizado 100 g/m². Mendonza et al. (2017), utilizaram 280 g/m² de FF. Possivelmente, os menores valores de inchamento são em função da maior quantidade de resina utilizada nas lâminas, que penetra nos poros ocupando espaços vazios e reduz a adsorção de moléculas de água.

Sutiawan et al. (2021) produziram painéis compensados com lâminas de *Anthocephalus cadamba* Miq, nas seguintes condições: três camadas de lâminas, coladas como AC em gramatura de 134 g/m², prensadas a 180°C por 10 minutos, em pressão de 1,3 MPa. Desta forma, os autores obtiveram o valor médio de 5,31% de inchamento em espessura nesses painéis. Valor inferior aos encontrados no presente trabalho. Essa

diferença pode ser explicada, além dos diferentes produtos e diferentes espécies dos distintos trabalhos, pela densidade do painel, ou quantidade de lâminas. Sutiawan et al. (2021) utilizaram três camadas de lâminas para confeccionar os painéis de compensados, o que exigiu de menor tempo e pressão de prensagem para sua colagem. Dessa forma, as tensões aprisionadas nesses painéis, são menores, em relação ao painel LVL do presente trabalho, constituído de dez lâminas.

6.2 Propriedades mecânicas

Os valores médios das propriedades mecânicas de resistência ao cisalhamento na linha de cola, compressão paralela à grã e de flexão estática (módulo de ruptura (f_m) e módulo de elasticidade (E_M)) para cada tratamento, são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores médios para propriedades de resistência mecânica (MPa)

Tratamentos	MPa			
	$f_{gv,0}$	$f_{c,0}$	f_m	E_M
T1	3,00 a	56,8 a	48,7 a	12848 a
T2	3,68 ab	59,6 a	70,9 ab	11205 a
T3	4,97 b	74,3 b	108,4 b	15882 a

*Valores em uma mesma coluna seguidos, por uma mesma letra, são idênticos estatisticamente.

T1 – painel LVL com ácido cítrico; T2 – painel LVL com ácido cítrico e MUF; T3 – painel LVL com MUF. $f_{gv,0}$ – cisalhamento na linha de cola; $f_{c,0}$ – compressão paralela à grã; f_m – módulo de ruptura em flexão estática; E_M – módulo de elasticidade em flexão estática.

Para a propriedade de resistência ao cisalhamento na linha de cola, houve diferença significativa entre os painéis do tratamento 1 (3,00 MPa) e os do tratamento 3 (4,97 MPa). Os painéis do tratamento T2 (3,68 MPa), não apresentaram diferença estatisticamente significativa comparado aos dos tratamentos dos painéis T1 e T3, o que pode ser observado na Figura 6. Os valores médios de resistência ao cisalhamento na linha de cola foram superiores ao limite mínimo especificado pela norma Europeia EN314-2 (2004), ou seja, superiores a 1 MPa.

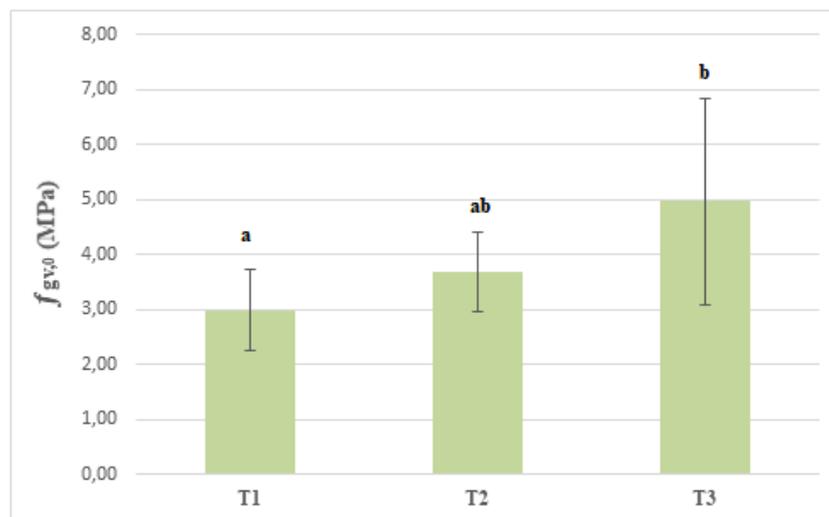


Figura 6 – Resistência ao cisalhamento na linha de cola dos diferentes tratamentos. T1 – painel LVL com ácido cítrico; T2 – painel LVL com ácido cítrico e MUF; T3 – painel LVL com MUF.

Se comparado aos valores encontrados na literatura para painéis de lâminas e/ou colados com ácido cítrico, o painel T1 (3,00 MPa) obteve boa resistência ao cisalhamento. Comparado a isso, resultados inferiores de resistência ao cisalhamento na linha de cola em painéis compensados compostos com ácido cítrico foram encontrados por Sun et al. (2019) de 0,78 Mpa; Zhao et al. (2019) de 0,99 MPa; Kusumah et al (2020) de 1,26 MPa; e Sutiawan et al., (2021) de 0,70 MPa.

Iwakiri et al. (2008) utilizando 360 g/m² em linha de cola dupla de adesivo FF, encontraram valor de 2,82 MPa para resistência ao cisalhamento na linha de cola de painéis LVL de *Eucalyptus dunnii* Maiden, o que foi inferior a todos os painéis do presente trabalho. Os autores atribuem os valores de resistência da linha de cola e tensão de cisalhamento a densidade da madeira que compõe o painel. Segundo os mesmos, painéis de maior densidade, tendem a ser menos porosos, o que dificulta a penetração de adesivo e a formação de ligações adesivas. Já madeiras menos densas, proporcionam uma melhor penetração ancoragem entre o adesivo e a madeira, devido a presença de poros. O *E. dunnii*, utilizado para as lâminas do trabalho de Iwakiri et al (2008), possui maior densidade que o *Pinus taeda* do presente trabalho, o que explica os valores para resistência ao cisalhamento na linha de cola.

Os mesmo autores, utilizando a mesma quantidade de adesivo FF para produzir painéis LVL de *E. grandis* Hill ex Maiden, encontraram um valor médio de resistência ao cisalhamento na linha de cola de 6,5 MPa, sendo superior aos encontrados neste trabalho (IWAKIRI et al., 2008). Esse fato pode ser explicado pela densidade da madeira.

Conforme os autores, madeiras mais densas tendem a aprisionar os vapores da etapa de prensagem, impedindo que os mesmos, atinjam a linha de cola e impeçam a polimerização do adesivo.

Mendonza et al. (2017), utilizaram 280 g/m² de adesivo FF para produzir painéis compensados e painéis LVL com lâminas de amescla (*Trattinnickia burserifolia*) O valor de resistência ao cisalhamento na linha de cola para os painéis compensados foi de 2,5 MPa, o que é inferior aos encontrados neste trabalho. Possivelmente relacionado ao tipo do painel e a maior permeabilidade e porosidade da amescla, o que afeta no enganchamento do adesivo.

Já em painéis LVL, esse valor foi de 4,0 Mpa, estando próximo aos valores de T2 (3,68 MPa) e T3 (4,97 MPa), porém sendo superior ao T1(3,00 MPa) deste trabalho. Neste caso, o tipo e a quantidade de adesivo tem grande influência. O FF em comparação ao AC do presente trabalho, possui melhores propriedades de adesão, além de ser utilizado em gramatura de 280 g/m².

Os valores médios para a propriedade de resistência a compressão paralela à grã, foram 56,83 MPa para o painel LVL do T1 e 74,31 MPa para o painel do T3, existindo diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) entre os painéis desses dois tratamentos. Houve também, diferença significativa entre os painéis T2 (59,6 MPa) e T3 (74,31 MPa). Não foram constatadas diferenças significativas entre os valores médios de $f_{c,0}$ para os painéis T1 e T2, conforme representado na Figura 7.

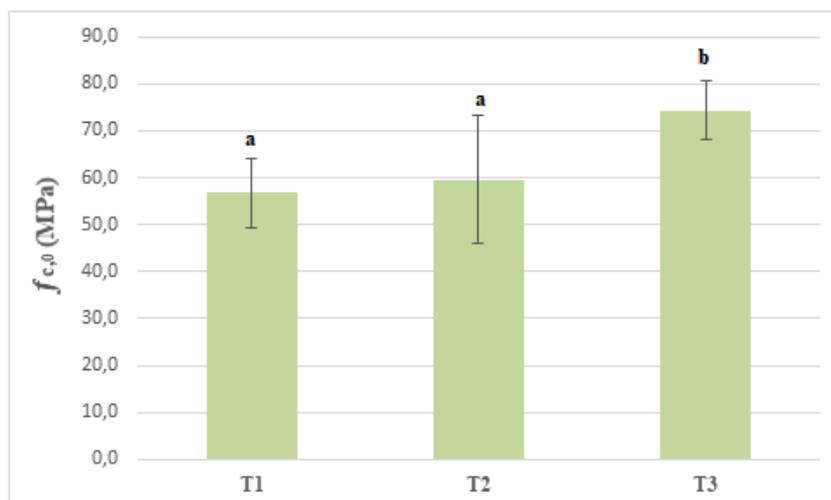


Figura 7 – Resistência a compressão paralela à grã dos diferentes tratamentos. T1 – painel LVL com ácido cítrico; T2 – painel LVL com ácido cítrico e MUF; T3 – painel LVL com MUF.

A resistência a compressão paralela a grã, pode ser explicada pela densidade da espécie, assim como a densidade do painel, e também pelo gramatura do adesivo utilizada nas lâminas. Painéis com maior quantidade de lâminas, e/ou de espécie mais densas, tendem a possuírem maior resistência ao serem submetidos a força de compressão. Já painéis com menos lâminas e/ou de menor densidade, considerados mais leves, possuem menor resistência a compressão paralela a grã.

Outro fator não menos importante, é o tipo de adesivo e a gramatura utilizada para colagem das lâminas. Maior valores de gramatura, promovem linhas de cola mais rígidas e melhor densificação dos painéis, dependendo da densidade dos mesmos. Dessa forma, as linhas de cola mais rígidas, impedem que as lâminas se separem durante a compressão paralela a grã.

Palma e Ballarin (2011), produziram painéis LVL de *Eucalyptus grandis* colados com adesivo a base de FF, com gramatura da linha de cola de 350 m/g². Os painéis eram compostos de 23 lâminas, e possuíam espessura de 50 mm. Desta forma, os autores encontraram valor médio para resistência a compressão paralela à grã de 58,05 MPa. O valor encontrado pelos autores foi superior ao encontrado nesse trabalho para os painéis T1 (56,8 MPa), porém inferior ao valor médio do e T2 (59,6 MPa) e T3 (74,3 MPa). No presente trabalho, foram utilizadas 10 lâminas de *Pinus taeda*, formando um painel de 20,5 mm de espessura. Um dos prováveis fatores que influenciaram a essa diferença entre os estudos, está nos diferentes tipos de adesivos. Os painéis que utilizaram MUF, apresentaram maior valor de resistência a compressão paralela á grã. Em comparação ao FF, o MUF proporciona melhor qualidade de colagem em painéis. Isso, aliado a menor densidade do pinus, utilizado no presente trabalho, proporcionaram maior aderência entre as lâminas devido ao maior enganchamento do adesivo.

No módulo de ruptura (f_m), houve diferença significativa entre os painéis T1 (48,7 MPa) e T3 (108,4 MPa). Quanto ao painel T2 (70,9 MPa), não houve diferença significativa entre esse painel e os painéis T1 e T3. Isso pode ser observado na Figura 8. Os painéis compostos exclusivamente de MUF, apresentaram maior módulo de ruptura em comparação aos painéis que utilizavam apenas AC.

Para o módulo de elasticidade (E_M), não houve diferenças significativas entre os painéis para ambos os tratamentos, os valores dos painéis oscilaram entre 11205,3 MPa e 15882,0 Mpa.

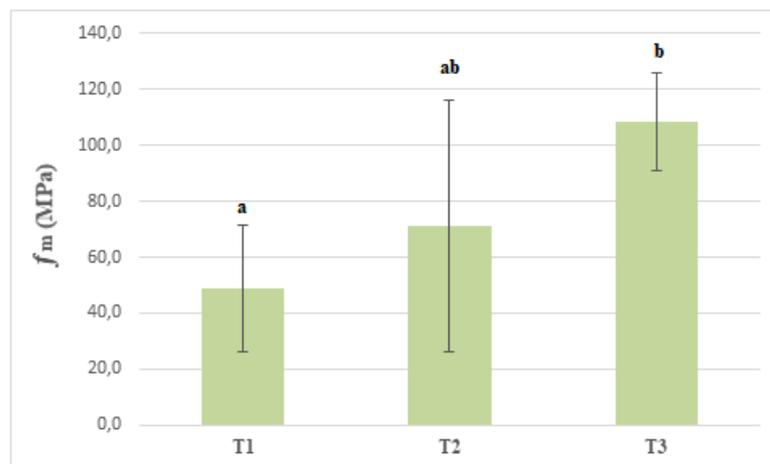


Figura 8 – Módulo de ruptura para os diferentes tratamentos. Tratamento: 1 – painel LVL com ácido cítrico; 2 – painel LVL com ácido cítrico e MUF; 3 – painel LVL com MUF.

Em compensados, num estudo de caracterização de propriedades físico-mecânicas de *Pinus* sp., utilizando adesivo poliuretano bi-componente, Campos et al. (2009), encontraram valores variáveis de f_m entre 39 MPa e 56 MPa e de E_M entre 10000 MPa e 15322 MPa. Os resultados de f_m e E_M do painel T1 (48,7 MPa) e E_M do painel T2 (11205 MPa) deste trabalho se encontram dentro dessa variação. Porém, o valor de T3 (108,4 MPa) do presente trabalho para f_m e T3 (15882 MPa) para E_M , foram superiores. Apesar da utilização da mesma espécie nos dois trabalhos, os maiores valores de módulo de ruptura, estão associados aos diferentes tipos de adesivos. A utilização exclusivamente de MUF, proporciona melhor valores de propriedades de flexão.

Em um estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas de painéis compensados e LVL com lâminas de Amescla (*Trattinnickia burserifolia*) coladas com resina a base de Fenol-Formaldeído, Mendonza et al (2017) obtiveram resultados médios de f_m e E_M de 81,71 MPa e 10.755 MPa para painéis LVL. O valor de f_m foi superior para os painéis T1 (48,7 MPa) e T2 (70,9 MPa) e inferiores aos painéis T3 (108,4 MPa) do presente trabalho. Essa superioridade em relação aos painéis T1 e T2, provavelmente está em função da baixa densidade da amescla, aliada ao adesivo FF, o que torna os painéis mais fortes. Quanto aos painéis T3, sua superioridade é em função do MUF, comparado ao FF. Quanto ao módulo de elasticidade (E_M), os valores de Mendonza et al. (2017), foram inferiores a todos os tratamentos do presente trabalho.

Em painéis compensados, Mendonza et al (2017), encontraram valor de f_m 61,46 MPa e E_M 7433 MPa. O f_m superior ao T1(48,7 MPa) e inferior a T2(70,9 MPa) e T3(108,4 MPa). E o E_M , sendo inferior aos painéis dos três tratamentos do presente trabalho. Este fato se atribui aos diferentes produtos (LVL x compensados), aliado ao tipo de adesivo.

Sutiawan et al. (2021) encontraram valores de f_m de 34,78 MPa e E_M de 2168 MPa em painéis de compensado de jaborão branco (*Anthocephalus cadamba* Miq) utilizando ácido cítrico como adesivo, e temperatura de prensagem dos painéis de 180°C. Os valores de flexão estática encontrados pelos autores, foram inferiores aos encontrados no presente trabalho, em função das diferentes espécies e dos diferentes tipos de painéis.

A tabela 4, a seguir, mostra a comparação entre as propriedades do presente estudo e trabalhos realizados utilizando AC e/ou adesivos sintéticos na fabricação de painéis laminados.

Tabela 4 – Comparação entre estudos realizados utilizando AC ou adesivos sintéticos como adesivo de painéis laminados (Continua...)

Referência	Adesivo	Tipo de painel	Espécie	Prensagem	f_m (Mpa)	E_M (Mpa)	$f_{gv,0}$ (Mpa)	$f_{c,0}$ (Mpa)	AA (%)	IE (%)
Este trabalho	10 (%)	LVL	<i>Pinus taeda</i>	180°C/20min**	48,7	12848	3,00	56,8	63,5	19,1
	AC									
	T1									
T2	AC/MUF				70,9	11205	3,68	59,6	50,8	16,9
T3	MUF				108,4	15882	4,97	74,3	56,8	15,4
Zhao et al. (2019)	140g/m ² AC/ S (75/25)	Compensado	<i>Populus tomentosa</i> Carr.	190°C/7min			0,99			
Kusumah et al. (2020)	30% AC/A (50/50)	Compensado	<i>Paraserienthes falcataria</i>	180°C/10min			1,26			
Sutiawan et al. (2021)	134g/cm ² AC	Compensado	<i>Anthocephalus cadamba</i> Miq.	190°C/10min	57,5	3309	0,70		60,9	4,35
Iwakiri et al. (2008)	360 g/m ² FF	LVL	<i>E. dunnii</i> Maiden	140° C/10min	106,9	13845	2,82			
			<i>E. grandis</i> Hill ex Maiden		102,6	12764				
Bal (2016)	200 g/m ² FF	LVL	<i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden	*	88,5	8701			23,23	2,59
			<i>Populus x euramericana</i>		63,3	4902			59,59	2,09
Costa et al. (2020)	UF*	Compensado	<i>Schizolobium amazonicum</i> Huber ex Ducke	110 – 120°C*					71,75	4,56
		LVL		140 – 160°C*					57,49	5,46
Palma e Ballarin (2011)	350 g/m ² FF	LVL	<i>Eucalyptus grandis</i>	130°C/1min	88,63	15871		58,05		

Tabela 4 – Comparação entre estudos realizados utilizando AC ou adesivos sintéticos como adesivo de painéis laminados (Conclusão.)

Referência	Adesivo	Tipo de painel	Espécie	Prensagem	f_m (MPa)	E_M (MPa)	$f_{gv,0}$ (Mpa)	$f_{c,0}$ (Mpa)	AA (%)	IE (%)			
Aydin (2004)	UF	LVL	<i>E. camaldulensis</i> Dehn. <i>Fagus orientalis</i> Lipsky	110°C/15min				51,7					
	180 g/m ² 160 g/m ²											94112 195122	55,3
Mendoza et al. (2017)	280 g/m ²	Compensado	<i>Trattinnickia burserifolia</i>	120°C/10,5min	61,46	7.433	2,5		64,8	2,1			
	FF	LVL									81,71	10.755	4,0
Muller et al. (2015)	200 g/m ²	LVL	<i>Eucalyptus saligna</i> <i>Pinus taeda</i>	135°C/15min	168								
	FF											100	
Campos et al. (2009)	400 g/m ²	LVL	<i>Pinus sp.</i>	60°C/15min	56	15322			64,8				
	Poliuretano											44	13644
	bicomponente											39	10000

f_m : Módulo de Ruptura em flexão; E_M : Módulo de Elasticidade em flexão; $f_{gv,0}$: Cisalhamento na linha de cola; $f_{c,0}$: Compressão paralela a resistência do grã; AA: Absorção de água; IE: Inchamento em espessura; AC: Ácido cítrico; AC/S: Ácido cítrico/Sacarose; AC/A: Ácido cítrico/Amido; FF: Fenol formaldeído; MUF: Melamina ureia formaldeído; UF: Ureia formaldeído; LVL: *laminated veneer lumber* Mpa: Megapascal; *Dado não disponibilizado; **programação de prensagem.

7 CONCLUSÃO

É possível produzir painéis LVL com ácido cítrico que atendam as exigências da norma Europeia EN314-2 (2004) quanto ao cisalhamento na linha de cola, com relação a resistência da colagem. Entretanto, os painéis compostos exclusivamente com melamina-ureia-formaldeído, apresentam características tecnológicas de propriedades superiores aos produzidos exclusivamente com ácido cítrico, sendo necessário pesquisas adicionais que visem conferir melhores propriedades físicas e mecânicas a esses painéis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - “Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials; ASTM D1037(2009)”, Philadelphia (2009).
2. ANGELATOS, A. S. et al. NMR structural elucidation of amino resins. **Journal of applied polymer science**, v. 91, n. 6, p. 3504-3512, 2004.
3. ANGUMEENAL, A. R.; VENKAPPAYYA, D. An overview of citric acid production. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie [Food science and technology]**, v. 50, n. 2, p. 367–370, 2013.
4. **APA - ENGINEERED WOOD ASSOCIATION**. C2022. Estrutural Composite Lumber (SCL). Disponível em: <https://www.apawood.org/structural-composite-lumber>. Acesso em: 29 de abr. de 2022.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE - **ABIMCI**. Estudo Setorial 2009. Ano Base 2008. Curitiba: ABIMCI; 2009.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14810.2-2006. Chapas de madeira aglomerada – Parte 2: Requisitos. Rio de Janeiro 2006.
7. AYDIN, I. et al. A comparative study on some physical and mechanical properties of Laminated Veneer Lumber (LVL) produced from Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) and Eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* Dehn.) veneers. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 62, n. 3, p. 218–220, 2004.
8. AZEVEDO, Elaine Cristina de. **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretana derivado do óleo de mamona**. 2009. 153 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2009.
9. BAL, B. C. Some technological properties of laminated veneer lumber produced with fast-growing Poplar and Eucalyptus. **Maderas Ciencia y tecnología**, v. 18, n. 3, p. 413-424, 2016.
10. BRIONES, R.V. LVL: Antecedentes generales del producto. In: BRIONES V. R.; CENDOYA H. P.; GUZMÁN F. M.; KLEMAREWSKI, A.; MACHUCA S., L. Informe Técnico 172: LVL vigas de chapas laminadas confeccionadas con *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*. 1a. edición. Concepción, Chile: INFOR : CORFO, 2007.
11. CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R. Estudo comparativo dos resultados de ensaio de tração perpendicular para MDF produzido em laboratório com fibras de pinus e de eucalipto utilizando ureia-formaldeído. **Matéria**, v. 9, n. 1, p. 32-42, 2004.

12. CAMPOS, Cristiane Inácio; MORAIS, Rafael Diogo Vasconcelos; DO NASCIMENTO, Maria Fátima. Caracterização físico-mecânica de painéis de madeira compensada produzidos com Pinus SP e resina poliuretana bi-componente. **Madeira: arquitetura e engenharia**, v. 10, n. 24, p. 37-50, 2009.
13. CARVALHO, W.; SILVA, D. D. V.; CANILHA, L.; MANCILHA, I. M. Aditivos alimentares produzidos por via fermentativa parte I: ácidos orgânicos. **Revista Analytica**, v. 18, p. 70-76, 2005.
14. CONNER, A. H.; Urea Formaldehyde Adhesive Resin. In: SALAMONE, J. C. *Polymeric Materials Encyclopedia*. Boca Raton– Florida: CRC Press, v. 11, p. 8496- 8501, 1996.
15. COSTA, A. A. et al. Caracterização tecnológica de painéis engenheirados produzidos com madeira de paricá. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e786986089–e786986089, 2020.
16. DEL MENEZZI, C. Et al. MUF Resins Improved by Citric Acid as Adhesives for Wood Veneer Panels. **Journal do Renewable Materials**, v. 11, n. 2, 2022.
17. DEL MENEZZI, C. et al. Reactions with wood carbohydrates and lignin of citric acid as a bond promoter of wood veneer panels. **Polymers**, v. 10, n. 8, p. 833, 2018.
18. DEL MENEZZI, Claudio Henrique Soares. **Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB)**. 2004. 242 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
19. DIETENBERGER, Mark; HASBURGH, Laura. Wood products thermal degradation and fire. **Reference module in materials science and materials engineering**, p. 1-8, 2016.
20. EN 314-1 (2004) Plywood – Bonding Quality – Part 1: Test Methods ; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2004.
21. EN 314-2 (2004) Plywood—Bond Quality—Requirements; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2004.
22. FARIA, D. L. et al. Propriedades físicas e mecânicas de painéis de lâminas paralelas (PLP) produzidos com madeira de Hevea brasiliensis. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 10, n. 3, p. 237–254, 2020.
23. FERREIRA, Juliana Ceccato. **Sínteses de adesivos de ureia-formaldeído com adição de lignina kraft e celulose nanocristalina**. 2017. 107 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2017.
24. FIB. FOOD INGREDIENTS BRASIL. Ácido cítrico, São Paulo. Editora **FiHBA**, n. 30 p 96 – 103, 2014. Disponível em https://revista-fi.com/upload_arquivos/201606/2016060501597001464892932.pdf.

25. FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. 2002. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de materiais) - Instituto de Química e Física de São Carlos, Universidade de São Paulo; 2002.
26. FIORUCCI, Antônio Rogério; SOARES, Márlon Herbert Flora Barbosa; CAVALHEIRO, Éder Tadeu Gomes. Ácidos orgânicos: dos primórdios da química experimental à sua presença em nosso cotidiano. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 15, p. 6-10, 2002.
27. GÉRARDIN, P. New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood—a review. **Annals of Forest Science**, v. 73, n. 3, p. 559-570, 2016.
28. HSE, C. Y. Development of melamine modified urea formaldehyde resins based on strong acidic pH catalyzed urea formaldehyde polymer. **Forest Products Journal**, V. 59, n. 5, 2009.
29. IWAKIRI, S. et al. Produção de painéis aglomerados de alta densificação com uso de resina melamina-uréia-formaldeído. **Cerne**, v. 11, n. 4, p. 323-328, 2005.
30. IWAKIRI, S. et al. Produção de painéis laminados unidirecionais-LVL com lâminas de *Schizolobium amazonicum*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda*. **Cerne**, v. 16, p. 557-563, 2010.
31. IWAKIRI, S. et al. Produção de painéis laminados unidirecional – LVL com madeiras de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden. **FLORAM**, vol.15, n2, p.1-7, 2008.
32. YOUNG NO, B.; KIM, M. G.; Evaluation of melamine-modified urea-formaldehyde resins as particleboard binders. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 106, n. 6, p. 4148-4156, 2007.
33. **JIS A5908-2003** (2007) Particleboard (in Japanese). Japanese Standards Association, Tokyo, Japan, pp 741.
34. KUSUMAH, S. et al. Utilization of sweet sorghum bagasse and citric acid for manufacturing of particleboard I: Effects of pre-drying treatment and citric acid content on the board properties. **Industrial Crops and Products**, n. 84, p. 34-42, 2016.
35. KUSUMAH, S. S. et al. Investigation of eco-friendly plywood bonded with citric acid – starch based adhesive. **IOP conference series. Earth and environmental science**, v. 460, n. 1, p. 012009, 2020.
36. LAM, F. Modern structural wood products. **Progress in structural engineering and materials**, v. 3, n. 3, p. 238–245, 2001.
37. LEMOS, V. T. **Ácido cítrico via solo e seus efeitos na nutrição do cafeeiro**. 2015. 90 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

38. LIMA, N. N.; MENDES, L. M.; SÁ, V. A. D.; BUFALINO, L. Propriedades físico-mecânicas de painéis LVL produzidos com três espécies amazônicas. *Cerne*, v. 19, n. 3, p. 407-413. 2013.
39. MATOS, Jorge Luis Monteiro de. **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de Pinus taeda L.** 1997. 117p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.
40. MENDES, R. F. et al. Efeito da associação de bagaço de cana, do tipo e do teor de adesivo na produção de painéis aglomerados. *Ciência Florestal*. v. 22, n. 1, 2012.
41. MENDES, Yasmim Dias. Potencial adesivo do ácido cítrico na confecção de painéis de Lâminas Paralelas (LVL). 2021. 37 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) — Universidade de Brasília, Brasília, 2021.
42. MENDOZA BORGES, Z. M. S. H. et al. Estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas de painéis compensados e laminated veneer lumber (LVL). *Nativa*, v. 5, p. 588-593, 2017.
43. MÜLLER, M. T. et al. Influência de diferentes combinações de lâminas de Eucalyptus saligna e Pinus taeda em painéis LVL. *Ciência Florestal*, v. 25, p. 153-164, 2015.
44. MUÑOZ-VILLA, A. et al. Ácido Cítrico: Compuesto Interesante Citric Acid: Interesting Compound. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, v. 6, n. 12, 2014.
45. NAKAMURA, A. P. D. **Propriedades de painel biocompósito produzido com fibras de coco-da-baía e ácido cítrico como adesivo.** 2018. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade de Brasília. 2018.
46. NEUVONEN, E. et al. **Laminated Veneer Lumber - Wood Based Panels Technology.** Reports/LVL, Department of Forest Products Marketing, 1998. Disponível em: <http://www.hochstrate.de/micha/finnland/reports/replvl.html>. Acesso em: 17. Jul. 2022.
47. NGADIANTO, A. et al. Karakteristik papan partikel dari limbah kulit kacang tanah dengan perekat alami asam sitrat dengan pelarut asap cair. *Journal Belantara*, v. 1, n. 2, 2018.
48. PALERMO, A. et al. **Seismic design of multi-storey buildings using laminated veneer lumber (LVL).** In 2005 NZSEE Conference Wairaki, New Zealand. Disponível em: https://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/handle/10092/266/12594951_Main.pdf;sequence=1. Acesso em: 17 jul. 2022.
49. PALMA, H. L.; BALLARIN, A. W. Propriedades físicas e mecânicas de painéis LVL de Eucalyptus grandis. *Ciência Florestal*, v. 21, n. 3, p. 559-566, 2011.

50. PEDROSA, Alexandre de Luna. Desempenho estrutural de vigas “I” constituídas por PLP e compensado de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden e OSB de *Pinus* spp. 2003. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
51. PIO, Nabor da Silveira. Produção de painéis estruturais de laminas paralelas (PLP) de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. 2002. 168 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2002.
52. ROJAS, F. S.; OJEDA, C. B.; BOSCH, M. E.; SÁNCHEZ, A. J. R. Diseño experimental para la calibración y validación de ácido cítrico y ácido tartárico por espectrofotometría uv-visible normal y derivada. In: *Anales de la Real Sociedad Española de Química*. Real Sociedad Española de Química. p. 181-188, 2008.
53. ROMAINOR, A. N. B. et al. Preparation and Characterization of Chitosan Nanoparticles-Doped Cellulose Films with Antimicrobial Property. **Journal of nanomaterials**, v. 2014, p. 1–10, 2014.
54. SALMEN, L. Temperature and water induced softening behaviour of wood fiber based material. Ph.D. Thesis. Department of Paper Technology. The Royal Institute of Technology. Stockholm. Sweden, 1982.
55. SANTOS, A. M. L.; DEL MENEZZI, C. H. S.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Comportamento teórico e experimental de vigas de madeira em perfil I: efeito do tipo de alma na resistência, rigidez e deslocamento vertical. **Scientia Forestalis**, v. 82, p. 131-141, 2009.
56. SANTOS, Deodato Peixoto dos. **Determinação eletroquímica de fenóis após processo de degradação de benzeno usando sensor à base de nanotubos de carbono-ftalocianina de cobalto**. 2012. Dissertação (Mestrado em Química Analítica e Inorgânica) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012
57. SANTOS, Emanuella Araújo dos. **Propriedades físicas e mecânicas de painéis compensados e LVL – Laminated Veneer Lumber**. 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2015.
58. SANTOS, Larissa Carvalho. **Síntese e caracterização de adesivos lignina-fenol-formaldeído para madeira e derivados**. 2016. 43f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2016.
59. SETTER, C. et al. Influence of wood species and adhesive type on the performance of multilaminated plywood. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 36, p. 50835-50846, 2021.
60. SHIGUE, Erich Kazuo. **Difusão da construção em madeira no Brasil: agentes, ações e produtos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura,

Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, University of São Paulo, São Carlos, 2018.

61. SOUZA, M. R.; TEIXEIRA, D. T. **Compostos à base de madeira**. Brasília: LPF, 2002.
62. STARK, N.; CAI, Z. Wood-based composite materials: panel products, glued laminated timber, structural composite lumber, and wood–nonwood composites. **Chapter 11 in FPL-GTR-282**, p. 11-1-11–29, 2021.
63. SULAIMAN, O. et al. Evaluation on the suitability of some adhesives for laminated veneer lumber from oil palm trunks. **Materials in engineering**, v. 30, n. 9, p. 3572–3580, 2009.
64. SUN, S.; ZHAO, Z.; UMEMURA, K. Further exploration of sucrose-citric acid adhesive: Synthesis and application on plywood. **Polymers**, v. 11, n. 11, p. 1875, 2019.
65. SUTIAWAN, J. et al. Influence of different hot-pressing conditions on the performance of eco-friendly jabor plywood bonded with citric acid adhesive. **Wood material science & engineering**, p. 1–10, 2021.
66. UMEMURA, K. et al. Application of citric acid as natural adhesive for wood. **Journal of applied polymer science**, v. 123, n. 4, p. 1991–1996, 2012a.
67. UMEMURA, K.; SUGIHARA, O.; KAWAI, S. Investigation of a new natural adhesive composed of citric acid and sucrose for particleboard. **Journal of wood science**, v. 59, n. 3, p. 203–208, 2013.
68. UMEMURA, K.; SUGIHARA, O.; KAWAI, S. Investigation of a new natural adhesive composed of citric acid and sucrose for particleboard II: effects of board density and pressing temperature. **Journal of wood science**, v. 61, n. 1, p. 40–44, 2014.
69. UMEMURA, K.; UEDA, T.; KAWAI, S. Characterization of wood-based molding bonded with citric acid. **Journal of wood science**, v. 58, n. 1, p. 38–45, 2012b.
70. WIDYORINI, R. et al. Bonding ability of a new adhesive composed of citric acid-sucrose for particleboard. **Bioresources**, v. 11, n. 2, p. 4526–4535, 2016a.
71. WIDYORINI, R. et al. Effect of starch addition on properties of citric acid-bonded particleboard made from bamboo. **BioResources**, v. 12, n. 4, p. 8068–8077, 2017.
72. WIDYORINI, R. et al. Manufacture and properties of citric acid-bonded particleboard made from bamboo materials. **Eur. J. Wood Prod.** v. 74, p. 57–65, 2016b.
73. ZHAO, Z. et al. Further exploration of sucrose-citric acid adhesive: Investigation of optimal hot-pressing conditions for plywood and curing behavior. **Polymers**, v. 11, n. 12, p. 1996, 2019.

